

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

NÁVRH FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY PRO RODINNÝ DŮM V OKRESE JIHLAVA

DESIGN OF A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT FOR A FAMILY HOUSE NEAR JIHLAVA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Vít Dvořák

ID: 221427

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh fotovoltaické elektrárny pro rodinný dům v okrese Jihlava

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem fotovoltaického děje a proveďte analýzu a rozbor používaných FV technologií pro výrobu FV článků. Proveďte rozbor technologií pro akumulátorové úložiště dle parametrů jednotlivých typů baterií. Zaměřte se na vyhodnocení trhu v ČR (výhody, dotace, podmínky, legislativa). V praktické části práce navrhnete různé varianty řešení FVE + bateriové úložiště pro rodinný dům dle konkrétního zadání a proveďte multikriteriální analýzu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce řeší návrh fotovoltaické solární elektrárny pro konkrétní rodinný dům v lokalitě Jihlavska. Cílem práce bylo seznámit se s technologií pro výrobu solárních systémů, vyhodnotit trh v ČR a vytvořit návrh fotovoltaické solární elektrárny. Celkem byly navrženy tři elektrárny za pomoci návrhového systému PV*SOL. Každý návrh využívá jinou technologii fotovoltaických článků. Výsledkem každého návrhu elektrárny je kompletně hotový projekt, z kterého vychází mnoho faktorů jako účinnost celého systému v dané lokalitě, finanční analýza, návratnost investic a další. Navíc tyto projekty splňují podmínky pro dosažení dotačního programu Nová zelená úsporám. Na konci práce jsou vyhodnoceny všechny tři navržené elektrárny a za pomoci multikriteriální analýzy je určen nejlepší a nejvýhodnější návrh elektrárny pro danou lokalitu. V závěru je pak uvedena myšlenka dalšího rozvoje projektu.

Klíčová slova

Slunce, fotovoltaika, fotovoltaický panel, fotovoltaický systém, křemík, akumulátor, PV*SOL.

Abstract

This diploma thesis deals with the design of a photovoltaic solar power station for a specific family house in the Jihlava region. The aim of the work was to get acquainted with technologies about the production of solar systems, evaluate the market in the Czech Republic and create a design of photovoltaic solar power station. Three designs of power stations were created with the help of the PV * SOL design system. Each design uses different photovoltaic cell technology. The result of each power station design is a complete finished project, which is based on many factors such as the efficiency of the entire system in a certain location, financial analysis, return on investment and more. In addition, these projects meet the conditions for the preparation of the subsidy program Nová zelená úsporám. At the end of the work, all three designed power stations are evaluated and with the help of multicriteria analysis, the best and most advantageous power station design for the given locality is determined. In the end, the idea of further development of the project is presented.

Keywords

Sun, photovoltaics, photovoltaic panel, photovoltaics systems, silicon, accumulator, PV*SOL.

Bibliografická citace:

DVOŘÁK, Vít. *Návrh fotovoltaické elektrárny pro rodinný dům v okrese Jihlava*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134603>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Vaněk.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Bc. Vít Dvořák
VUT ID studenta:	221427
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Návrh fotovoltaické elektrárny pro rodinný dům v okrese Jihlava.

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu této diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 24. května 2021

.....
podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. ENERGIE SLUNCE	13
1.1 ENERGIE SLUNCE NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY	13
2. FOTOVOLTAIKA.....	14
2.1 HISTORIE.....	14
2.2 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉHO DĚJE	14
3. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A PANELY.....	15
3.1 OBECNĚ.....	15
3.2 DĚLENÍ DLE GENERACÍ.....	15
3.2.1 První generace.....	15
3.2.2 Druhá generace	15
3.2.3 Třetí generace.....	16
3.3 VÝROBA FV ČLÁNKŮ	16
3.3.1 Křemík.....	16
3.3.2 Monokrystalický křemík	16
3.3.2.1 Czochralského metoda výroby	17
3.3.2.2 Metoda výroby pomocí zónového tavení	17
3.3.3 Polykrystalický / multikrystalický křemík.....	18
3.3.3.1 Metoda výroby polykrystalického čistého křemíku.....	19
3.3.4 Výroba solárních článků z křemíku.....	20
3.3.5 Výroba FV panelů z křemíkových plátků.....	21
3.3.6 Solární články z amorfniho křemíku	22
3.4 NOVÉ TYPY FV PANELŮ A JEJICH VÝZKUM.....	23
3.4.1 Perovskitové solární panely.....	23
3.4.2 Organické solární panely.....	24
4. FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY	25
4.1 FV SYSTÉMY OPATŘENÉ BATERIÍ	26
4.1.1 AC Coupling	26
4.1.2 DC Coupling	26
5. STŘÍDAČ.....	27
5.1 OSTROVNÍ STŘÍDAČE.....	27
5.2 STŘÍDAČE PŘIPOJENÉ K ROZVODNÉ SÍTI.....	27
5.3 HYBRIDNÍ STŘÍDAČE	27
5.3.1 Symetrický a asymetrický střídač pro třífázové zapojení	29
5.4 STŘÍDAČE PODLE ZAPOJENÍ PANELŮ	30
5.4.1 Velké centrální střídače	30
5.4.2 Stringové střídače	30
5.4.3 Modulové střídače.....	30

6.	AKUMULÁTOROVÁ ULOŽIŠTĚ	31
6.1	MOŽNÉ TYPY BATERÍ PRO FV SYSTÉMY	32
6.1.1	Nikl-kadmiová baterie.....	32
6.1.2	Olověné baterie.....	32
6.1.3	Lithium iontové baterie.....	33
6.1.3.1	NMC	33
6.1.3.2	LFP.....	34
6.1.3.3	LTO.....	34
6.1.4	Sodík-iontová baterie	34
7.	VYHODNOCENÍ TRHU V ČR.....	35
7.1	NOVÁ ZELENÁ ÚSPORÁM.....	36
7.1.1	Podmínky přidělení dotace po instalaci FV systému.....	36
7.1.2	Podmínky pro propojení FV systému s distribuční soustavou.....	36
8.	NÁVRH FV ELEKTRÁRNY PRO KONKRÉTNÍ RODINNÝ DŮM	38
8.1	LOKALITA	39
8.2	POPIS DOMU	39
8.3	VÝBĚR SYSTÉMU PRO NÁVRH	40
8.4	NÁVRH FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ	40
8.4.1	Trojrozměrné modelování.....	41
8.4.2	Výběr střídače pro všechny návrhy.....	43
8.4.3	Výběr akumulátoru pro všechny návrhy.....	44
8.5	NÁVRH SYSTÉMU S MONOKRYSTALICKÝMI PANELY.....	45
8.5.1	Výběr FV panelů pro FVS MONO	45
8.5.2	Instalace a zapojení FVS MONO v návrhovém systému	46
8.5.3	Celkové investiční náklady na FVS MONO	47
8.5.4	Shrnutí celkových výsledků a parametrů navrženého FVS MONO.....	47
8.6	NÁVRH SYSTÉMU S POLYKRISTALICKÝMI PANELY	49
8.6.1	Výběr FV panelů pro FVS POLY	49
8.6.2	Instalace a zapojení FVS POLY v návrhovém systému	50
8.6.3	Celkové investiční náklady na FVS POLY	51
8.6.4	Shrnutí celkových výsledků a parametrů navrženého FVS POLY.....	51
8.7	NÁVRH SYSTÉMU S AMORFNÍMI PANELY	53
8.7.1	Výběr FV panelů pro FVS CIS.....	53
8.7.2	Instalace a zapojení FVS CIS v návrhovém systému.....	54
8.7.3	Celkové investiční náklady na FVS CIS.....	55
8.7.4	Shrnutí celkových výsledků a parametrů navrženého FVS CIS.....	55
8.8	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ TŘÍ NÁVRHŮ	57
8.9	MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA	58
9.	ZÁVĚR.....	60
	LITERATURA.....	62
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	65
	SEZNAM PŘÍLOH.....	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Mapa doby slunečního svitu za rok na území ČR [2].....	13
Obr. 3.1 Schematické znázornění výroby monokrystalu Czochralského metodou [6] .	17
Obr. 3.2 Rozdíl polykrystalický (vlevo) a monokrystalický (vpravo) solární článek [8]	18
Obr. 3.3 Schéma syntézy trichlorsilanu a čištění pomocí destilace [6]	19
Obr. 3.4 Schéma Siemensovy metody separace [6].....	20
Obr. 3.5 Skladba panelu s krystalickými křemíkovými články (EVA – Etylen – Vinyl – Acetát) [10]	21
Obr. 3.6 Ukázka FV panelu z amorfního křemíku [11]	22
Obr. 3.7 Ohebný a částečně průhledný perovskitový panel ve formátu A4 [13].....	23
Obr. 3.8 Organický solární panel [14]	24
Obr. 4.1 Jednoduchý FV systém v OFF-GRID zapojení [16]	25
Obr. 4.2 Zapojení akumulátoru AC Coupling a DC Coupling [17]	26
Obr. 5.1 Zapojení hybridního střídače [17]	28
Obr. 5.2 Rozdíl mezi symetrickým a asymetrickým střídačem	29
Obr. 5.3 A) Velké centrální střídače B) Stringové střídače C) Modulové střídače [21]	30
Obr. 8.1 Dům pro návrh FV systému.....	38
Obr. 8.2 Trojrozměrný návrh domu a okolí, pohled na dům	41
Obr. 8.3 Trojrozměrný návrh domu a okolí, letecký pohled na celé navržené prostředí	41
Obr. 8.4 Porovnání zastínění střechy s umístěnými panely a střechy hospodářské budovy, obě střechy jsou směrem k jihu.....	42
Obr. 8.5 Zapojení FVS MONO ve stringu.....	46
Obr. 8.6 Grafika toku energie FVS MONO.....	48
Obr. 8.7 Zapojení FVS POLY do série.....	50
Obr. 8.8 Grafika toku energie FVS POLY	52
Obr. 8.9 Zapojení panelů do dvou stringů FVS CIS.....	54
Obr. 8.10 Grafika toku energie FVS CIS.....	56
Obr. 8.11 Výstupní graf porovnání energetických výnosů z jednotlivých návrhů	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 7.1 Požadované parametry na FV systém a výše dotační podpory [26]	37
Tab. 8.1 Rozpis jednotlivých spotřebičů a jejich roční spotřeba	39
Tab. 8.2 Údaje o použitém střídači Fronius Symo Hybrid 3.0-3-S [27].....	43
Tab. 8.3 Údaje o použitém akumulátoru Huawei Luna 2000-5-S0 [28]	44
Tab. 8.4 Údaje o použitých modulech HCM72X9 [29]	45
Tab. 8.5 Rozpis položek systému s monokrystalickými panely a jejich cena	47
Tab. 8.6 Shrnutí hlavních parametrů navrženého FVS MONO	48
Tab. 8.7 Údaje o použitých modulech HCP78X9 [30].....	49
Tab. 8.8 Rozpis položek systému s polykrystalickými panely a jejich cena	51
Tab. 8.9 Shrnutí hlavních parametrů navrženého FVS POLY	52
Tab. 8.10 Údaje o použitých modulech AVANCIS PowerMax 4.0 145 W [31]	53
Tab. 8.11 Rozpis položek systému s tenkovrstvými panely a jejich cena	55
Tab. 8.12 Shrnutí hlavních parametrů navrženého systému	56
Tab. 8.13 Výsledné hodnoty multikriteriální analýzy	59

ÚVOD

Fotovoltaické systémy mají v dnešní době široké uplatnění. Je to dáno hlavně tím, že je cena těchto systémů velice přijatelná. Fotovoltaika by mohla v budoucnosti být jedním z hlavních zdrojů elektrické energie. Dnešní elektrická energie se vyrábí primárně z fosilních paliv, jejichž zásoby se již znatelně tenčí. To ale není jediný problém, je třeba si uvědomit, že energie z fosilních paliv není energie čistá, ale velmi zatěžuje životní prostředí. S technologickým rozvojem a neustále se zvyšující spotřebou elektrické energie je třeba využívat hlavně obnovitelné zdroje energie a tím chránit naše životní prostředí. Téměř největším obnovitelným zdrojem je energie ze slunečního záření, které dopadá na naši zem. Právě díky fotovoltaike se tak dá sluneční energie velmi dobře využít. Výhled do budoucnosti ve výrobě elektrické energie by mohl být právě v malých lokálních zdrojích, jako je třeba malá fotovoltaická elektrárna zásobující soběstačný dům. Odpadají tak problémy spojené s distribucí energie z velkých elektráren na fosilní paliva, a celkově problémy se ztrátami na vedení elektrické energie. Je ale jasné, že velkoodběratelé jako jsou různé výrobní závody se bez velkých elektráren zatím úplně neobejdou, ale mohou tuto spotřebu alespoň částečně snížit použitím fotovoltaiky. Rodinné domy ale mohou být naprosto soběstačné. A to s rostoucím počtem lidí na planetě energetickému systému jistě odlehčí.

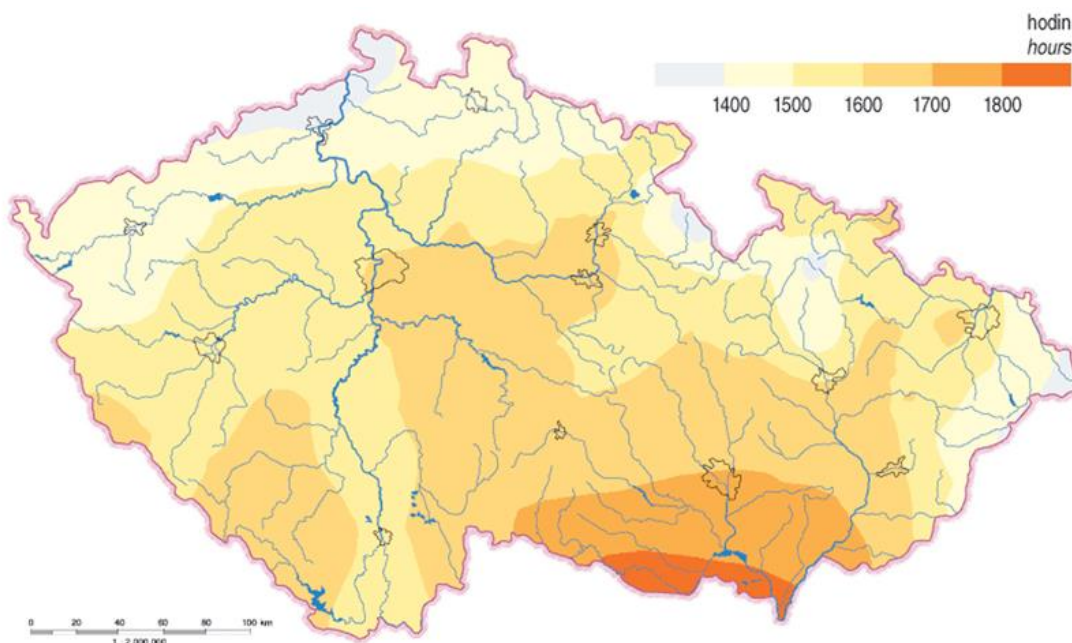
Proto je v této práci popsáno, jakým způsobem se právě díky fotovoltaiickým systémům získává energie ze slunce, jaké technologie fotovoltaiika používá a také jak energii z fotovoltaiiky uchovat pro dobu kdy zrovna nesvítí. Dále je práce zaměřená na téma podpory výstavby FV systém ze strany české legislativy. Praktická část této práce se zaměřuje na návrh FV systému pro konkrétní rodinný dům v určené lokalitě. Úkolem bylo navrhnout více FV systémů s různými parametry a porovnat jejich využití a návratnost v dané lokalitě.

1. ENERGIE SLUNCE

Centrem sluneční soustavy je hvězda zvaná Slunce. Stáří slunce se odhaduje přibližně na 4,6 miliard let a mělo by svítit ještě asi 5 až 7 miliard let. To z něj činí pro obyvatele Země téměř nevycerpateľný zdroj energie. Hmotnost Slunce je $2 \cdot 10^{30}$ kg a průměr $1,4 \cdot 10^6$ km. Teplota na povrchu Slunce činí zhruba 5 780 K. Odhadovaný výkon Slunce je tedy zhruba $3,8 \cdot 10^{26}$ W. Na planetu Zemi dopadá zhruba $1,7 \cdot 10^{17}$ W, což odpovídá toku energie přibližně $1,367 \text{ kW/m}^2$. Slunce na zemský povrch dodá ročně zhruba $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh solární energie. V kontrastu s tím je roční průměrná světová spotřeba energie $100 \cdot 10^{12}$ kWh. Z toho je vidět, že Slunce nabízí zhruba 15 000 x víc energie, než je celková světová spotřeba energie. Slunce je nejideálnějším zdrojem energie z hlediska životního prostředí, náročnosti získávání energie i celkové dostupnosti, proto je nutné tuto energii využít např. za pomoci FV systémů. [1]

1.1 Energie Slunce na území České republiky

V rámci České republiky se průměrný roční dopad sluneční energie rok od roku liší. Je to závislé na podílu srážek a oblačnosti v daném roce. Lze ale říci, že průměrně je roční úhrn doby dopadu slunečního svitu na Českou republiku v rozmezí 1400 – 1800 hodin. Za rok na území ČR dopadne $1000 - 1100 \text{ kWh/m}^2$ energie. Nejvíce sluneční záření převažuje v níže položených oblastech jako je třeba jižní Morava. [1]



Obr. 1.1 Mapa doby slunečního svitu za rok na území ČR [2]

2. FOTOVOLTAIKA

2.1 Historie

Fotovoltaický jev byl pozorován již v roce 1839. A. E. Becquerel, detekoval přímou přeměnu energie slunečního záření na energii elektrickou, čímž byl objeven fotovoltaický jev. V roce 1876 W. G. Adams a R. E. Day objevili stejný efekt pro selenové krystaly. Princip fotoelektrického jevu objasnil až Albert Einstein v roce 1905. Další roky byl fotoelektrický jev předmětem bádání v oblasti fyziky a nebyl nijak využíván. Až v roce 1954 byl vyroben první křemíkový fotovoltaický (dále jen FV) článek s účinností převyšující 4 %. Velký vývoj FV článků začal díky kosmonautice a za první praktické využití článků se považuje vypuštění vesmírné sondy Vanguard I již v roce 1958. Další roky byla fotovoltaika rozvíjena, a zvyšovala se její účinnost, až našla uplatnění i pro rodinné domy. V dnešní době dosahuje účinnost až 20 %. Největším výrobcem dnešních FV panelů a zároveň největším výrobcem elektrické energie za jejich použití je Čína. [3]

2.2 Princip fotovoltaického děje

Základním principem je přímá přeměna slunečního záření na elektrickou energii. Této přeměny je možné dosáhnout za pomoci fotovoltaického článku. Fotovoltaický článek je ve sém principu vlastně polovodičová dioda, která využívá PN přechod. Základním prvkem je křemíková destička s vodivostí typu P, na kterou se při výrobě vytvoří polovodič typu N, tyto vrstvy jsou odděleny tzv. PN přechodem. Pokud je článek osvětlen, vznikne v polovodiči vnitřní fotoelektrický jev. Fotony začnou vyřazet elektrony z valenčního pásu do pásu vodivostního, to znamená že se v polovodiči z krystalové mřížky začnou uvolňovat záporné elektrony. Na PN přechodu se vytvoří elektrické napětí. Toto napětí u křemíkových článků dosahuje zhruba hodnoty 0,5 V. Tak se vlastně mění ve fotovoltaickém článku energie slunečního záření na energii elektrickou. Pokud se k článku za pomoci vodičů připojí spotřebič nebo baterie, začnou se kladné a záporné náboje vyrovnávat a obvodem začne procházet stejnosměrný elektrický proud. Pokud je požadavkem dosáhnout vyššího napětí nebo proudu, zapojuje se do sebe větší množství článků, buď sériově nebo paralelně. Proud je úměrný ploše ozáření článku. [4]

3. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A PANELY

3.1 Obecně

Základem panelu nebo také modulu je FV článek, jehož napětí je velmi nízké (asi 0,5 V). Pro použití se proto články skládají do panelů, buď paralelně pro zvýšení napětí, anebo sériově pro zvýšení proudu, dle potřeby použití. Panely se pak obecně mohou skládat do polí, solárních generátorů, opět podle potřeby výstupních hodnot a použití. Propojují se různě mezi sebou v rámci celé FV elektrárny. Články je třeba chránit proti nepříznivým klimatickým podmínkám, proto jsou umístěny mezi ochranné vrstvy, může to být sklo nebo nějaká plastová folie.

3.2 Dělení dle generací

FV články se mohou rozdělit do tří generací, každá generace má své výhody a nevýhody a liší se oblast jejich použití.

3.2.1 První generace

Články této generace jsou vyráběny z destiček monokrystalu křemíku, v nichž je vytvořen velkoplošný PN přechod. Tato generace článků má dobrou účinnost, stabilní výkon a je často využívána pro větší instalace, zvláště pak pro instalace, kde je omezení prostorem, kvůli větší výtěžnosti z menšího prostoru. Nevýhoda je hlavně v množství použití křemíku, dříve byla také nevýhodou jejich cena, ale ta postupně klesá. Obecně je snaha snížit množství použitého křemíku a tím snížit složitost a energetickou náročnost výroby a v neposlední řadě snížit i cenu. Vývoj na trhu nicméně ukazuje, že v následujících letech bude křemík neustále převažovat nad všemi technologiemi díky své účinnosti a technologickému pokroku.

3.2.2 Druhá generace

V této generaci je kladen důraz právě na snížení potřeby křemíku. Proto se používají tenkovrstvé články. To má ale za následek snížení celkové účinnosti, stability a zvýšení míry degradace, postupné snížení účinnosti během životnosti článku. Nejběžnější jsou články z mikrokystalického nebo amorfního křemíku. Dnes se začínají používat i jiné materiály než křemík [5].

Původně se u druhé generace uvažovalo, že kvůli snížené potřebě křemíku a nižší technologické náročnosti při výrobě, budou tenkovrstvé články levnější, ale není tomu tak. Jsou dražší právě kvůli nižší popularitě na trhu, která je způsobena malou účinností. Přesto se tenkovrstvé články stále využívají. Druhá generace totiž umožňuje vyrábět FV články na flexibilních materiálech, jako jsou například folie, což rozšiřuje i oblast využití článků.

3.2.3 Třetí generace

Tuto generaci by bylo možné chápat jako hypotetickou. Je to plán dalšího výzkumu. Snahou je absorbovat maximální počet fotonů a zvýšit tak generaci párů elektron díra (docílení vyššího proudového zisku). Celkově pak maximalizovat využití energie fotonů, zvýšit účinnost a snížit náročnost a výrobní náklady. Do třetí generace už se mohou ale zařadit již komerčně používané dvouvrstvé, tzv. tandemové články a také trojvrstvé články. Dalším směrem, kterému se věnuje výzkum jsou například vícevrstvé solární články, články využívající „horké“ nosiče náboje pro generaci párů elektron díra, technologie termofotovoltaické přeměny, koncentrátorové články, organické články a další. [5]

3.3 Výroba FV článků

3.3.1 Křemík

Nezákladnějším a nejpoužívanějším materiálem pro výrobu FV článků je křemík. Křemík má ze všech dostupných polovodičů v přírodě nejlepší vlastnosti pro průmyslovou výrobu, je to tak obecně nejrozšířenější polovodič v elektrotechnice. V přírodě je zastoupen prakticky v neomezeném množství. Je nezávadný jak zdravotně, tak i pro životní prostředí. Lze jej snadno tavit, rychle krystalizuje, má dostatečnou pevnost a dá se dobře zpracovávat. Díky jeho elektrickým vlastnostem jej lze používat v oblasti vysokých výkonů a do kmitočtu až 3 GHz, při obvyklých teplotách vyskytujících se běžně na Zemi (max. 125 °C). U křemíku se při výrobě dosahuje až 99,999 999 9 % čistoty, je to tedy jedinečný technický produkt. Výchozím materiálem pro získání křemíku je křemičitý písek. [6]

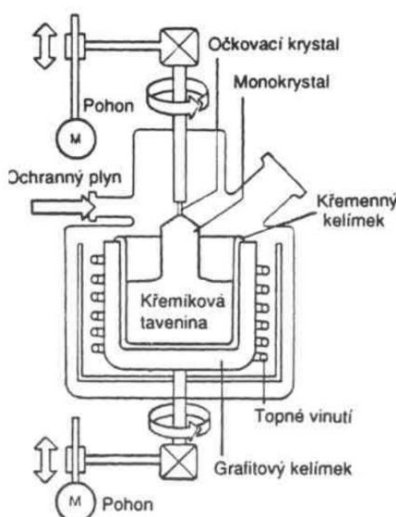
3.3.2 Monokrystalický křemík

Základním a nejstarším typem je monokrystalický křemík. Polovodičivá vlastnost není vázána na monokrystalický stav. Solární článek je celkem jednoduchá elektronická součástka, může proto být zhotovena i z polykrystalického křemíku. Při vyšších nárocích u jemnějších integrovaných obvodů by však elektrické průrazy a rekombinace nosičů náboje na hranicích zrn a nedokonalosti krystalů vedly k poruchám, nebo i k úplnému výpadku. Polovodičové prvky vysoce integrovaných obvodů potřebují téměř dokonalý monokrystal. Velké monokrystalové se získávají řízenou krystalizací z taveniny. Růst z plynné fáze je sice možný, avšak energeticky i časově náročný a tedy nerentabilní. [6]

FV články vyrobené z monokrystalického křemíku v dnešní době běžně dosahují účinnosti 19 % a více, v laboratorních podmínkách 26 % a teoreticky až 37 %. Tyto články jsou nejúčinnější při přímé složce slunečního záření, méně vhodné pak při difuzi záření. [7]

3.3.2.1 Czochralského metoda výroby

Tuto metodu je možné také nazvat metoda tažení z kelímku. Kusovým polykrystalickým křemíkem se naplní kelímek z nejčistšího křemenného skla. Ten je zasazen do opěrného grafitového kelímku a v komoře uzavřené ochranným sklem zahříván elektrickým odporovým vytápěním na teplotu mírně převyšující teplotu tavení křemíku, 1420 °C. Po roztavení náplně se uvede do kontaktu s povrchem taveniny očkovací křemíkový krystal (dokonalý krystal křemíku o síle tužky), upevněný ve svisle posuvitelném otočném držáku. Následkem odvádění tepla očkovacím krystalem, křemík na jeho konci tuhne a očkovací krystal tak roste. Tažení očkovacího krystalu z taveniny odpovídá rychlost růstu několika centimetrů za hodinu. V dnešní době je možné táhnout válcové monokrystaly o průměru až 200 mm a hmotnosti až 70 kg. Zásadní nevýhodou této metody je to, že vysoce čistá křemíková tavenina reaguje s křemenným sklem kelímku. Do krystalu se tak dostávají nečistoty a zhoršuje se jeho odpor. [6]



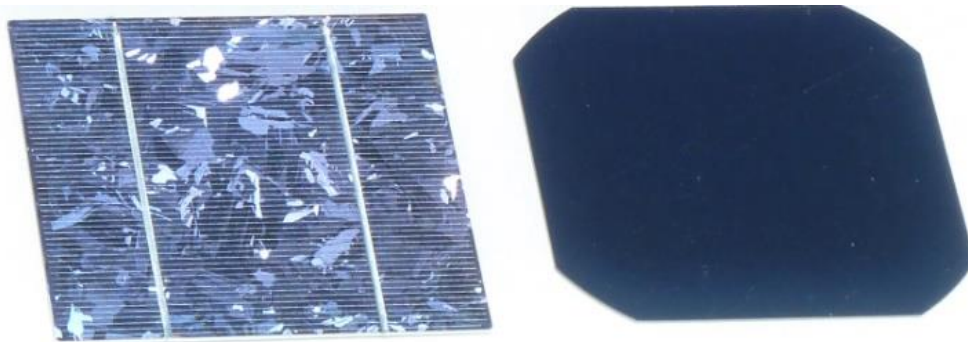
Obr. 3.1 Schematické znázornění výroby monokrystalu Czochralského metodou [6]

3.3.2.2 Metoda výroby pomocí zónového tavení

Tato metoda je založena na využití vysokého povrchového napětí roztaveného křemíku, pro tažení není potřeba kelímek. Mezi konci dvou silných křemíkových tyčí se drží křemíková tavenina. Za pomoci vysokofrekvenčního indukčního ohřevu dochází k tavení křemíku. Do tavné tyče se přenáší energie z vysokofrekvenční cívky. Na spodním konci svisle držené tyče z polykrystalického křemíku vzniká tavné pásmo, které se udržuje v kontaktu s tyčí očkovacího krystalu rovněž upevněnou ve svislém posuvném držáku. Spouštěním tyči nebo zvedáním vysokofrekvenční cívky může tavné pásmo projít od očkovacího krystalu až k hornímu konci tyče. [6] Díky tomu, že tavenina není s ničím v kontaktu nemůže ji nic znečistit. Lze tedy vyrobit velmi čistý křemík s vysokými hodnotami odporů.

3.3.3 Polykrystalický / multikrystalický křemík

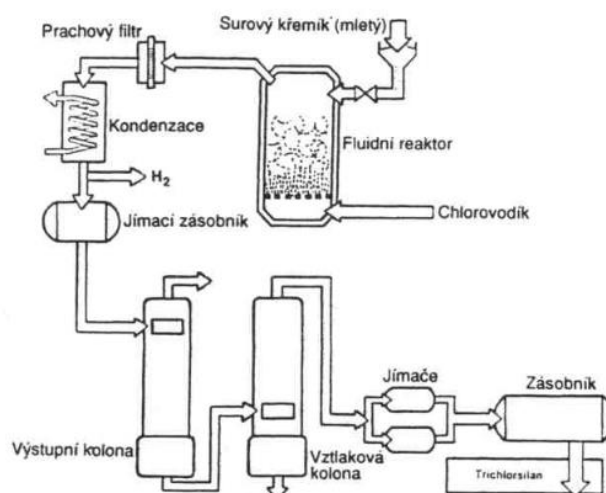
Multikrystalický křemík, polykrystalický s velkými krystaly byl poprvé vyroben v 80. letech minulého století a byl vyvinut kvůli kladení důrazu na snížení náročnosti výroby a ceny materiálu pro výrobu FV modulů. Účinnost FV článků vyrobených z polykrystalického křemíku je u komerčně vyráběných FV panelů běžně 14 až 17 %, v laboratorních podmínkách až 23 %. [7] Všeobecně mají tedy polykrystalické FV články menší účinnost při dopadu přímé složky slunečního záření než články z monokrystalu. Pokud je ale záření difuzní a nesvítí přímo do monokrystalu, monokrystalickému článku klesá účinnost. Polykrystalický článek nemá jednotnou plochu, ale je lámáný, díky čemuž dokáže lépe pochytit difuzní záření. Hodí se tedy mnohem více do oblastí, kde jsou zhoršené klimatické podmínky a nesvítí zde přímé sluneční záření. To znamená, že pokud by se integračně porovnali hodnoty monokrystalického a polykrystalického FV článku v oblasti s větším množstvím difuzního záření, polykrystalický článek by paradoxně vyrobil více energie než monokrystalický článek.



Obr. 3.2 Rozdíl polykrystalický (vlevo) a monokrystalický (vpravo) solární článek [8]

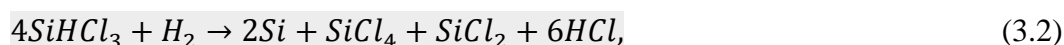
3.3.3.1 Metoda výroby polykrystalického čistého křemíku

Název "polykrystalický čistý křemík" je poněkud zavádějící, protože polykrystalický čistý křemík není totožný s polykrystalickým solárním článkem. Výchozí látkou pro čistý křemík je metalurgický surový křemík, který se získává z částic křemence a uhlí v elektrických nízkosachetných pecích při teplotě 1800 °C. Takovýto křemík má uplatnění v průmyslu, čistota se pohybuje okolo 98 %. Křemík využívaný v elektrotechnice se musí různými metodami dále čistit, je na to několik metod. Nejčastější metoda čištění využívá chlorsilový proces. Ve fluidním reaktoru reaguje jemně mletý surový křemík s chlorovodíkem. Řízením reakce vzniká 90 % trichlorsilanu SiHCl_3 . Prvním krokem postupu je adice (napojení) chlorovodíku na skupinu Si-Si, při odštěpení vodíku, přičemž se přechodně vytváří při vyšší teplotě v plynném prostředí stabilní dichlorid křemíku, který ihned dále reaguje s chlorovodíkem, tento vztah popisuje rovnice



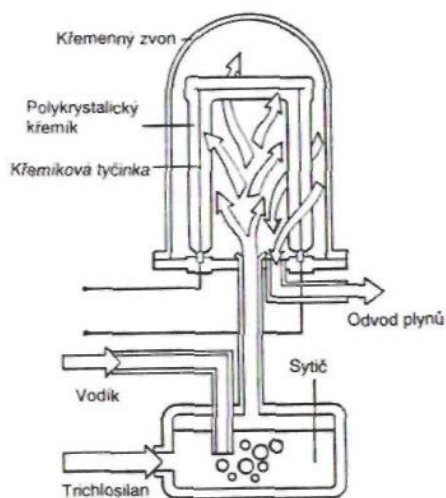
Obr. 3.3 Schéma syntézy trichlorsilanu a čištění pomocí destilace [6]

Těkavé produkty reakce z proudu plynů kondenzují, nastupuje separace nežádoucích prvků vázaných v nesnadno těkavých chloridech. Vzniklý trichlorsilan se dále čistí následnou pečlivou destilací v kolonách z ušlechtilé oceli a zbavuje se doprovodného chloridu křemičitého, nižších silanů a ostatních cizích látek. Z vysoce čistého trichlorsilanu se pomocí štěpení Siemensovou metodou vytváří čistý polykrystalický křemík. Tepelné štěpení probíhá v atmosféře nejčistšího vodíku. Reakci lze popsat rovnici



ze které je možné vyčíst, že neprobíhá zcela, proto se zbylý trichlorsilan a chlorovodík ve vhodném místě opět zavádí do oběhu.

Při rozkladu v reaktoru se křemík usazuje na žhavé tyče (1150 °C) z nejčistšího křemíku, tím je také zabráněno tomu, aby se křemík znečistil cizorodými látkami. [6]



Obr. 3.4 Schéma Siemensovy metody separace [6]

Čistý polykrystalický křemík lze použít dále na výrobu polykrystalických solárních článků, anebo na výrobu monokrystalu, který se vyrábí právě z čistého polykrystalického křemíku.

Čistý polykrystalický křemík má podobu lomových kamenů, proto se dále taví v obřích pecích a odlévá do kvádrů.

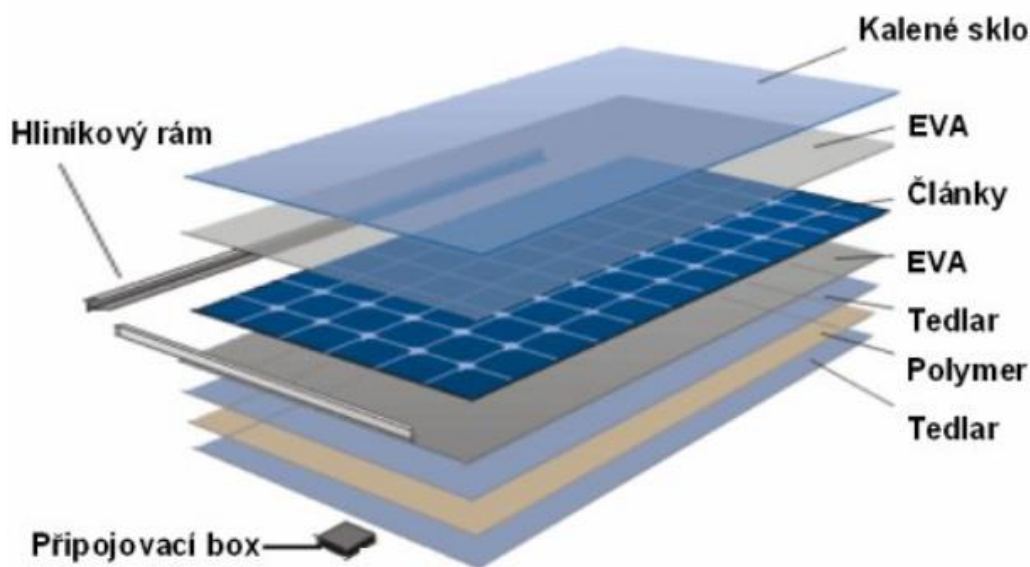
3.3.4 Výroba solárních článků z křemíku

Vyrobené tlusté kulaté tyče monokrystalického křemíku nebo kvádry polykrystalického křemíku se dále řezou diamantovou kotoučovou nebo častěji používanou drátovou pilou na tenké plátky. Tyto plátky jsou dále zabrušovány, aby neměly ostré hrany. Plátky jsou polovodiče typu P dotovány bórem, čištěny a odleptány mokrou chemickou cestou (odleptány, pro odstranění zničené vrstvy krystalu vlivem předešlého řezání). Následně je třeba vytvořit za pomoci difuze vrstvu polovodiče typu N. To se děje difundací fosforu z nosného plynu do povrchu plátku. Vzniklá vrstva polovodiče typu N na hranách plátku je nežádoucí, musí se odstranit. Na zadní stranu plátku se za pomoci techniky sítotisku nanese kontakty. Dále se na přední stranu tiskne antireflexní vrstva a celá sestava se zapeče. Výsledkem je hotový solární článek.

3.3.5 Výroba FV panelů z křemíkových plátek

Vzhledem k materiálům, z nichž jsou solární články vyrobené, nejsou příliš odolné vůči okolním klimatickým podmínkám, proto je důležité je nějakým způsobem chránit. Dalším faktem je, že samostatné články mají malý výkon a je třeba je spojovat dohromady. Proto se články usazují do modulů a navzájem se propojují dle potřeby a daného zadání.

Konstrukce solárních panelů jsou velmi rozmanité. Panel má za úkol hermeticky uzavřít solární články. Důležitým faktorem FV panelů je jejich pevnost a odolnost. Náhlými změnami teplot, ve velké ploše panelu, vzniká pnutí, proto jsou moduly opatřeny kovovými nebo plastovými rámy pro jejich zpevnění. [9]



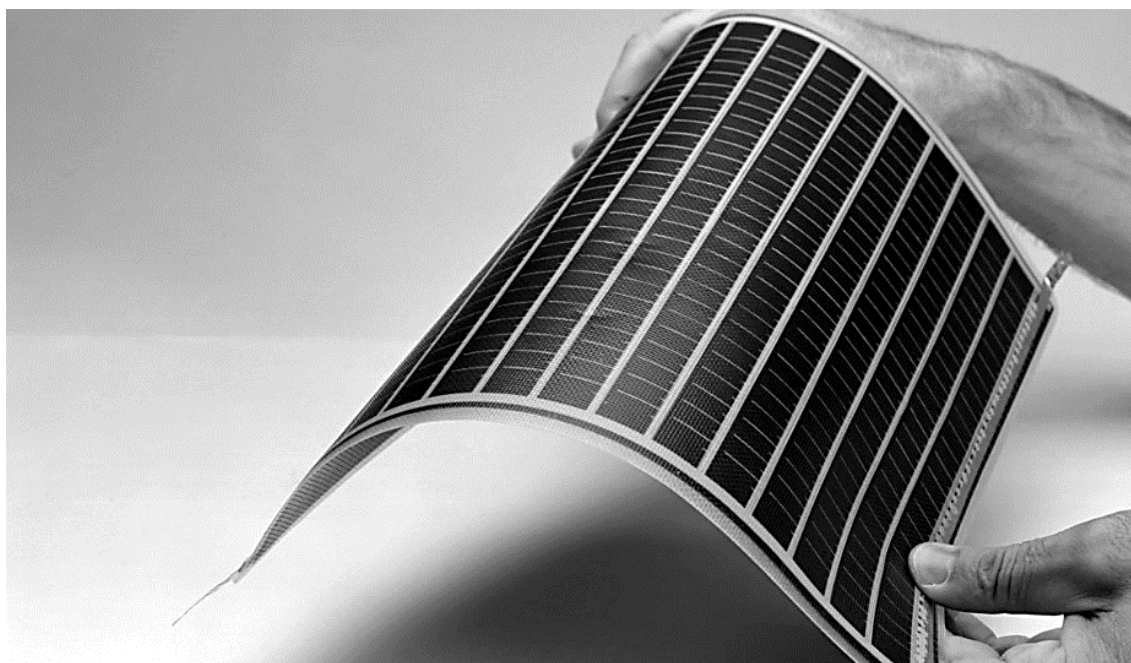
Obr. 3.5 Skladba panelu s krystalickými křemíkovými články (EVA – Etylen – Vinyl – Acetát) [10]

Pospojované solární články jsou umístěny mezi dvě skla a utěsněny. Přidáním dalšího skla vznikne tepelně-izolační solární modul. Časté jsou i konstrukce se sklem z přední strany a nalepenou folií případně se zalitím do průhledné hmoty ze zadní strany. Zadní strana panelu může být tvořena i plechovou deskou. Panely mohou být vsazeny do pevného hliníkového rámu. Připojení panelu do systému se provádí ve vodotěsné instalační krabici na zadní straně, případně kabelem, který je součástí panelu. [9]

3.3.6 Solární články z amorfního křemíku

Solární články z amorfního křemíku nemají nijak zvláště vysokou účinnost, maximálně 13,8 %, což je oproti monokrystalickým a polykrystalickým článkům poměrně málo. Jejich výhodou je tvarovatelnost, pružnost, flexibilita, lehkost a zároveň tedy aplikace na místa kde je obtížné instalovat klasické pevné solární články. Hlavní předností je také to, že je oproti předešlým popsaným technologiím použito pro výrobu velice malé množství křemíku, amorfni články jsou tedy daleko jednodušší na výrobu. FV panely z amorfního křemíku by mohly být v budoucnu i výrazně levnější.

Vyrábí se za pomoci rozkladu vhodných sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Na podložku ze skla, nerezů nebo plastové folie se napařují tři tenké vrstvy materiálu, transparentní přední kontakt, amorfni křemík a zadní kontakt. Spojení amorfni křemík znamená, že je to křemík s nepravidelnou strukturou, a právě díky nepravidelné struktuře dokáže absorbovat více slunečního záření a může být vrstva křemíku daleko tenčí. Z těchto důvodů se amorfni solární panely také často označují jako tenkovrstvé solární panely. Amorfni solární články je možné nejčastěji najít na zařízeních s velmi malým odběrem elektrické energie např. kalkulátory, hodinky atd. Dalším použitím může být nalepená folie na pálené krytinové tašce nebo lze folii umístit i na oblečení. Dnes je amorfni křemík taky používán pro výrobu tenkovrstvých solární panelů v podobném provedení jako nejvíce rozšířené monokrystalické solární panely. Cena tenkovrstvých solárních panelů je však zatím vyšší než je tomu u klasických solárních panelů.



Obr. 3.6 Ukázka FV panelu z amorfního křemíku [11]

3.4 Nové typy FV panelů a jejich výzkum

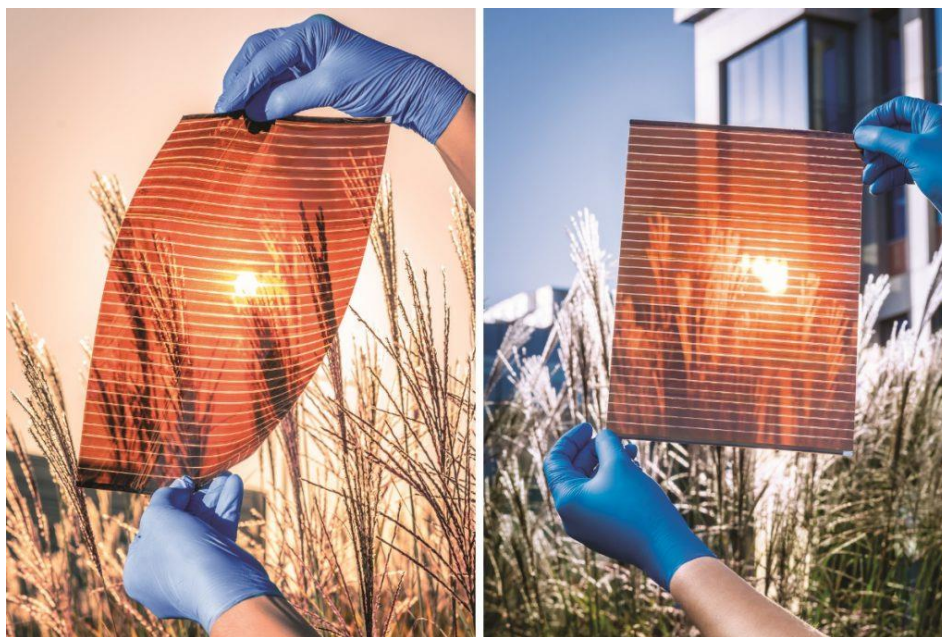
Dnešní výzkum se hlavně zaměřuje na hledání nových materiálů nahrazující křemík, jelikož už je, z hlediska účinnosti FV přeměny na hranci svých možností. Vědci se snaží najít hlavně levnější a ekologičtější materiál, který by byl snadný na výrobu a montáž a dosahoval by účinnosti alespoň takové jaké se dosahuje za použití křemíku nebo pokud možno i vyšší.

3.4.1 Perovskitové solární panely

Jedním z takových materiálů pro výrobu nových fotovoltaických panelů by mohl být perovskit. Perovskit je minerál s chemickým vzorcem CaTiO_3 (oxid titaničito-vápenatý). Pro výrobu fotovoltaického článku se využívá uměle krystalizovaný perovskit.

První FV článek z perovskitu byl vyroben v roce 2009 s účinností kolem 4 %. Dnes účinnost v laboratorních podmínkách dosahuje až na 23 %, což je daleko rychlejší pokrok, než byl dříve zaznamenán u křemíku. Jednou z hlavních předností perovskitového článku je to, že je jeho výroba daleko jednodušší a levnější. Panely se totiž za pomoci techniky tisku mohou natisknout na různé materiály a proto jsou panely z těchto článků daleko lehčí, dají se ohýbat a je možné je dokonce zhotovit i průhledné. Průhledné panely by pak mohly pokrývat okna, displeje notebooku a dalších chytrých zařízení.

První průmyslovou výrobu a testování ve větším měřítku započala polská firma Saule Technologies. Dnes již nabízí první produkt, solární žaluzie pokryté perovskitovými solárními články. Ve vývoji má tato firma i tzv. Carport, který by měl sloužit jako dobíjecí přístřešek pro elektromobil. [12]



Obr. 3.7 Ohebný a částečně průhledný perovskitový panel ve formátu A4 [13]

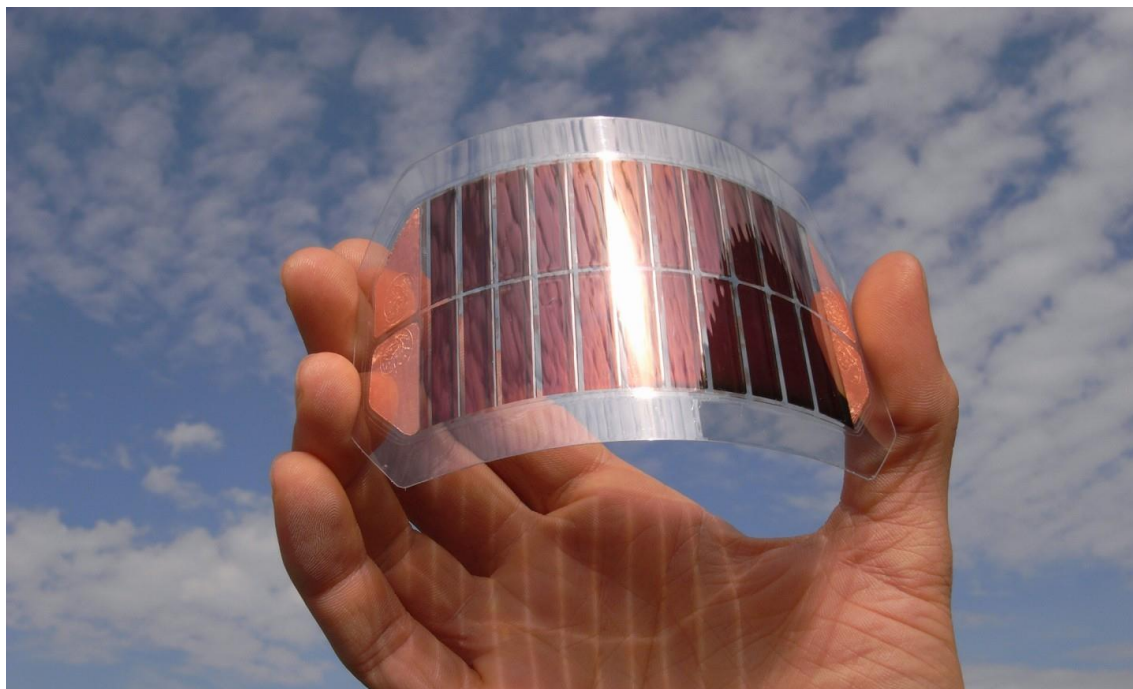
3.4.2 Organické solární panely

Organické solární panely jsou vize budoucnosti, vzhledem k tomu že by měly být přírodního původu, tudíž i z dobře dostupných materiálů.

Organické panely oproti klasickým křemíkovým panelům využívají polovodičové organické materiály na bázi uhlíku. Lze tedy říci, že jsou blízké plastům. Mohou tedy být ohebné, průsvitné, tenké, lehké, a v budoucnu i naprosto průhledné. První panely vznikají na tiskárnách, protože obvody organické fotovoltaiky lze rozpustit v tištěné náplni, což umožňuje rychlost výroby, a také to výrazně snižuje náklady na výrobu. Po zavedení do průmyslové výroby by organické solární panely mohly být až stonásobně levnější. Díky tomu, že mohou být velmi tenké, bude možné je také tisknout téměř kamkoliv.

Environmentální dopad je zatím velkou neznámou, v současné době je zkoumána biodegradovatelnost panelů, které využívají šetrnější celulózu. Značnou nevýhodou je zatím jejich relativně nízká efektivita, to se ale časem může rychle změnit. Jedny z prvních vyrobených článků dosahovali 3 až 6 % účinnosti. V roce 2018 byla již prolomena 15% hranice a dnes čínští vědci dosahují účinnosti okolo 17 %. Právě v Číně se začínají testovat pro zvýšení efektivitu i tandemové organické články. [14]

Další stádium výzkumu organických solárních článků zkoumají izraelští vědci na univerzitě v Tel Avivu. Jejich nová technologie, by měla v budoucnu využívat geneticky zkonstruované bílkoviny, které by měly za pomoci fotosyntézy vyrábět elektrickou energii. [15]



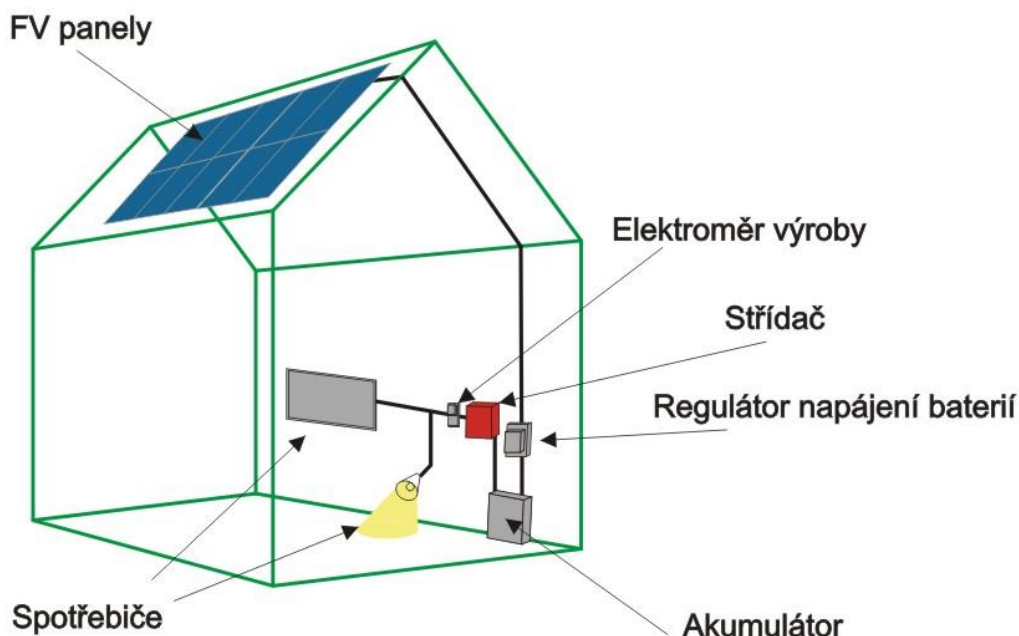
Obr. 3.8 Organický solární panel [14]

4. FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY

Fotovoltaickým systémem rozumíme vlastně kompletní fotovoltaickou elektrárnu. Tato diplomová práce je zaměřena hlavně na použití fotovoltaické elektrárny na rodinný dům, v základu je ale princip systému podobný, jako u velkých fotovoltaických elektráren pro velkovýrobu elektrické energie. Základním prvkem FV systému je FV panel, ten je umístěn v našem případě na střeše domu nebo v jiných případech kdekoli na zemi, kde je průměrně největší množství slunečního záření. Pokud to prostředí či terén dovolí, orientujeme panely vždy k jihu. Dále jsou panely připojeny na střídač, který mění DC napětí z panelů na AC napětí sítě. Dále se systémy mohou lišit. Základní dělení systému je na systémy ON-GRID a OFF-GRID.

ON-GRID je systém napojen na elektrickou rozvodnu síť. Buď je napojen přímo do sítě (samozřejmě nesmí chybět měřicí hodiny vyrobené a dodané energie) nebo může primárně energii spotřebovat dům a přebytky energie dodávat do sítě nebo systém můžeme rozšířit o bateriové uložení a zvýšit tak vlastní spotřebu vyrobené energie.

Dalším systémem je systém OFF-GRID, neboli ostrovní systém. Ten může být opatřen akumulátorovým uložením nebo rozšířen o další zdroj, př. diesel generátor, vodní elektrárnu, větrnou elektrárnu., atd.



Obr. 4.1 Jednoduchý FV systém v OFF-GRID zapojení [16]

4.1 FV systémy opatřené baterií

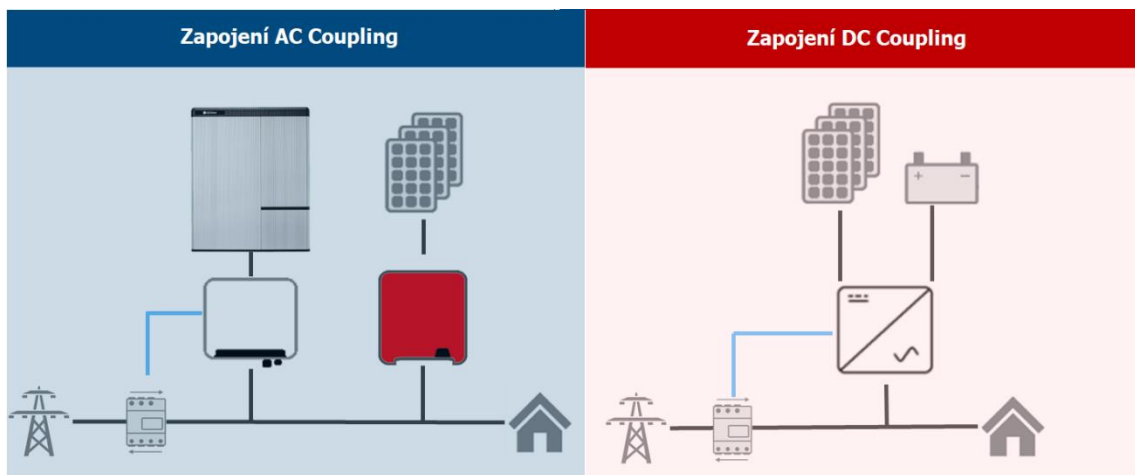
FV systémy, které jsou opatřeny baterií můžeme dělit dle zapojení baterie na AC coupling a DC coupling. A také dle toho, do jaké rozvodné sítě je systém zapojen, jednofázové nebo třífázové.

4.1.1 AC Coupling

U tohoto zapojení je baterie s bateriovým měničem zapojena přímo na rozvod AC sítě domu. DC generovaná energie z FV panelů je připojena do fotovoltaického měniče, kde je přeměněna na AC energii. Tyto dva měniče jsou zapojeny do stejné sítě, bateriový měnič pak přebytečnou (nespotřebovanou) energii z panelů ukládá do baterie. V případě nedostatku AC energie v síti zase baterie dodává energii přes měnič zpět. Celý systém tak potřebuje dva měniče. Toto zapojení se využívá jak u jednofázového zapojení (pro instalovaný výkon od 1,5kWp až po 3,68kWp) tak i u třífázového zapojení (pro instalovaný výkon od 5kWp až do 300kWp). [17]

4.1.2 DC Coupling

FV panely a baterie jsou připojeny na jeden hybridní měnič. DC generovaná energie je předávána měniči a do baterie. Tento hybridní měnič je připojen také do AC sítě domu. Přes integrovaný DC/AC měnič dodává energii s baterie. Veškerá vyrobená energie z FV panelů tak vždy prochází přes baterii. Toto zapojení se využívá u třífázové sítě pro instalovaný výkon od 3kWp až do 7kWp. [17]



Obr. 4.2 Zapojení akumulátoru AC Coupling a DC Coupling [17]

5. STŘÍDAČ

Je to měnič DC elektrického napětí na střídavé a obráceně. Také je to nedílná součást veškerých FV systémů, které vyrábí DC složku elektrické energie. Pro distribuci elektrické energie je však třeba AC složka. Hlavním parametrem střídače je efektivita přeměny elektrické energie a minimalizace ztrát.

Rozlišují se dva základní druhy. Ostrovní střídače v OFF-GRID systému a střídače zapojené do sítě ON-GRID systém. Nad rámec těchto dvou druhů jsou hybridní střídače, které kombinují ostrovní střídače a síťové střídače. Další dělení může být podle zapojení a počtu fází, nebo podle zapojení FV panelů do střídače.

5.1 Ostrovní střídače

Užívají se v zapojení OFF GRID, kdy využívají stejnosměrnou složku elektrické energie a přeměňují ji na standardně používanou střídavou síť obvykle 50 Hz 230 V pro jednofázové zapojení do výkonu jednotek kW, anebo třífázovou síť 50 Hz 400 V obvykle používanou pro větší odběry řádově desítky kW. [18]

Ostrovní systém se používá v místech, kde není soustava připojena na distribuční síť, anebo v případech, kdy systém je připojen na distribuční síť, ale střídač musí být galvanicky oddělen od distribuční soustavy, aby nedocházelo k přetokům do sítě. Pokud by k tomu došlo a nebyla zhotovena s dodavatelem energie smlouva o výkupu, následovali by vysoké sankce. Tento systém primárně a systematicky ukládá a využívá energii z baterie. Výhodou ostrovního měniče je dobrá životnost a robustnost, je možné je i přetížit, a to až o 200 %. [18]

5.2 Střídače připojené k rozvodné síti

Mohou se dělit na síťové střídače, které jsou zapojeny pouze do elektrické rozvodné sítě tzv. čistý ON-GRID systém nebo na střídače v kombinovaném zapojení. Čistý ON-GRID systém je určen pro elektrárny, které slouží pouze pro dodávku energie do elektrické rozvodné sítě. Příkladem mohou být velké elektrárny na polích. Tento systém je v dnešní době již na ústupu vzhledem k nízké ceně výkupu. Dnešním trendem jsou spíše střídače v kombinovaném zapojení ON-GRID OFF-GRID. Kombinované zapojení využívá hybridní střídače, které jsou popsány v další kapitole.

5.3 Hybridní střídače

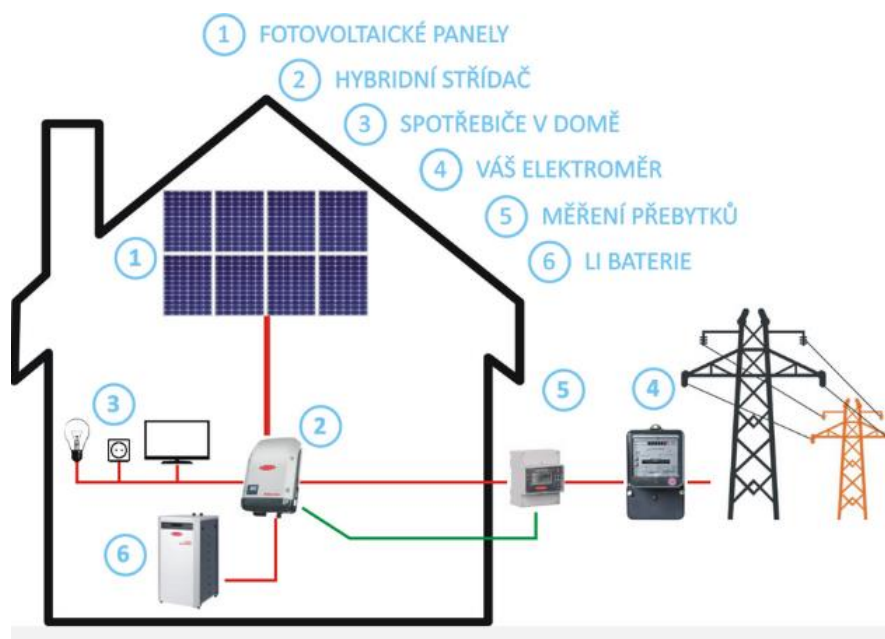
Hybridní střídače jsou kombinací síťových a ostrovních střídačů. Vynikají hlavně tím, že jsou schopny optimalizovat a vyrovnat rozdíly mezi nestabilní výrobou a spotřebou elektrické energie. Jejich provoz tak vyjde daleko výhodněji vzhledem k využitému výkonu. Celý systém za použití tohoto střídače vyjde tak výhodněji i po finanční stránce.

Hybridní střídače je možné také rozdělit podle zapojení na jednofázové nebo třífázové. Jednofázové zapojení střídače je pro Českou republiku ne příliš použitelné. Většina domů je totiž připojena na třífázovou distribuční síť a domovní zapojení spotřebičů je rozfázováno. Jednofázový střídač pak dodává energii jen pro jednu fázi a zbytek energie u dalších fází se nakupuje, což není ekonomicky rentabilní. Při jednofázovém zapojení střídače je proto třeba domovní instalaci přepojit na jednu fázi. U třífázového zapojení střídače takový problém odpadá. Hlavní nevýhodou je ale fakt, že systém je připojen trvale do sítě a energie není tak dobře využita jako u ostrovního systému, musí se tedy nějakým způsobem řešit nechtěné přetoky do sítě. [19]

Nespornou výhodou hybridního střídače je, že využívá tzv. „chytrou síť“, kdy reguluje orientaci změny energie FV systému do a z distribuční sítě a ukládá přebytečnou energii do akumulátorů. Řídí vlastně celý tok elektrické energie a energetickou bilanci objektu. Oproti ostrovním systémům mají hybridní měniče tu výhodu, že neukládají veškerou energii do akumulátorů, ale ukládají do ní pouze přebytky, omezí se tak zbytečné ztráty v akumulátorech a vyrobená energie se využije na maximum. Jsou opatřeny vnitřním systémem řízení, který má za úkol rozhodnout, zda se energie hned spotřebuje, uloží do akumulátoru a v poslední řadě pustí jako přebytek do distribuční sítě. [20]

Hybridní střídač tedy dokáže plynule a současně v reálném čase pracovat ve třech módech, a to v připojení do sítě (ON-GRID), přifázování (GRID-TIE) a zároveň v ostrovním režimu (OFF-GRID). Jsou tedy budoucností většiny FV systémů. [20]

Další výhodou je, že u třífázového zapojení dokáží pracovat v asymetrickém módu a rozdělují tak zisk z FV systému do jednotlivých fází dle potřebného nerovnoměrného odběru spotřebičů.



Obr. 5.1 Zapojení hybridního střídače [17]

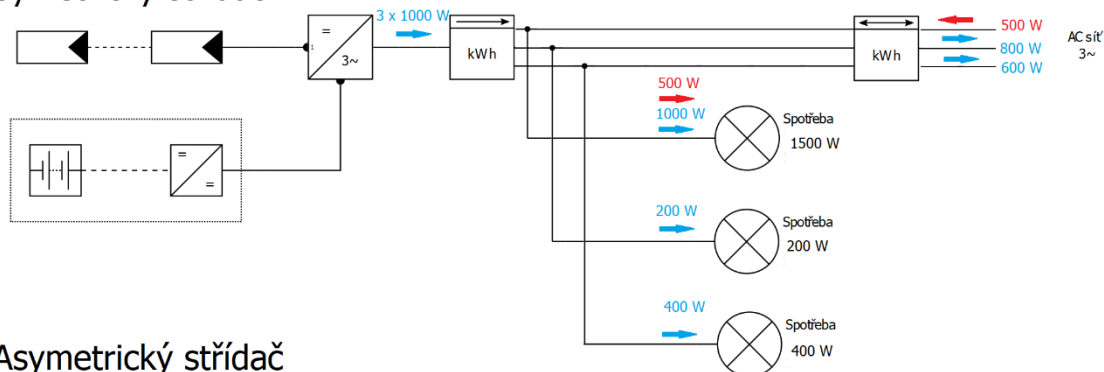
5.3.1 Symetrický a asymetrický střídač pro třífázové zapojení

Třífázové střídače by se dále daly rozdělit na symetrické a nesymetrické střídače, dle toho, jak rozdělují zisk z FV systému do jednotlivých fází.

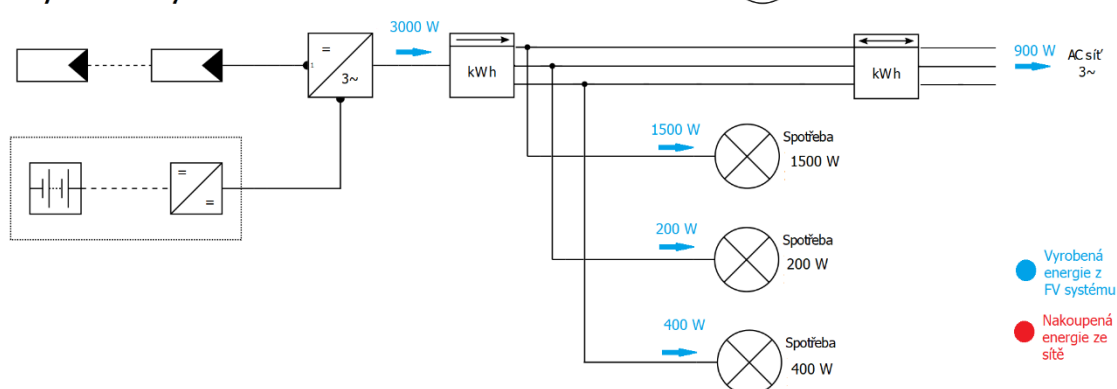
V České republice se měří odběr elektrické energie z distribuční sítě po fázích, ve většině ostatních států se měří odběr v součtu fází. Což může být vzhledem k použití síťového střídače opomíjený problém. Může se tedy stát, že FV systém se symetrickým střídačem dodává energii rozdělenou do jednotlivých fází symetricky. Na jedné fázi je menší odběr, a proto se přetok prodává do sítě, na druhé fázi zase energie z FV systému nestačí, proto se dokupuje energie ze sítě. Vzniká tedy problém toho, že na jedné fázi prodáváme elektřinu za nízkou výkupní cenu a na druhé fázi kupujeme dražší energii ze sítě. Ve státech, kde se energie nakupuje v součtu fází to není problém, v České republice je to zásadní nevýhoda. Proto je pro Českou republiku výhodnější použít asymetrický střídač, který tento problém odstraňuje. Asymetrický střídač energii rozděluje podle odběru z jednotlivých fází, pokud se tedy na jedné fázi zvýší odběr, zvýší se taky distribuce energie z FV systému na tuto fázi a do ostatních fází jde zbytek výkonu z FV systému. Touto vlastností jsou opatřeny většinou hybridní střídače.

Další možností, jak eliminovat problém symetrického střídače je převést zapojení na jednu fázi. Na trhu je menší výběr asymetrických střídačů a většinou jsou dražší než symetrické střídače. Rozhodnutí je tedy vždy na investorovi, kterou možnost je třeba zvolit.

Symetrický střídač



Asymetrický střídač



Obr. 5.2 Rozdíl mezi symetrickým a asymetrickým střídačem

5.4 Střídače podle zapojení panelů

5.4.1 Velké centrální střídače

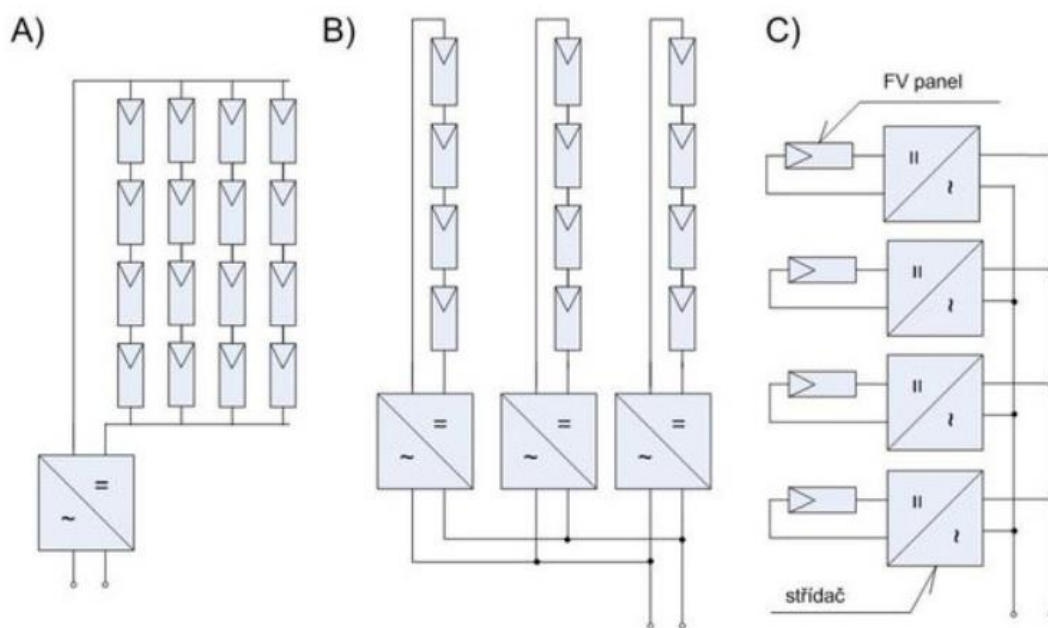
Toto zapojení je pro velké FV elektrárny a třífázové soustavy. Velká účinnost, společný výkonový bod. Zapojení se využívá pro velké elektrárny s výkonem nad 20 kW. [21]

5.4.2 Stringové střídače

Stringové nebo také řetězcové střídače využívají sériové nebo i paralelní zapojení FV panelů. Dle zapojení lze dobře upravit výstupní napětí z FV panelů, proto je možné lépe sledovat i výkon panelů. Použití pro střední a velké systémy do 20 kW. Nejčastější zapojení pro jednofázové soustavy. [21]

5.4.3 Modulové střídače

Je to nejméně výhodné zapojení panelu. U každého panelu je jeden modulový střídač, který sleduje jeho výkon. Nízká účinnost, obtížná údržba, vyšší náklady. Obvyklé použití je do výkonu 1 kW a pro jednofázové soustavy. [21]



Obr. 5.3 A) Velké centrální střídače B) Stringové střídače C) Modulové střídače [21]

6. AKUMULÁTOROVÁ ULOŽIŠTĚ

Pokud vyrábíme elektrickou energii, a nemáme pro ni odběr, je třeba energii uložit na dočasnou dobu do nějakého akumulátorového uložště, abychom tuto energii mohli využít, až ji vyrábět nebudeme. K tomu právě slouží akumulční, akumulátorové uložště. Obecně bychom akumulaci energie mohli rozdělit na dvě velké skupiny, a to fyzikální systémy (přečerpávací vodní elektrárny, tlakovzdušné elektrárny, setrvačníky, cívky, zásobníky tepla) a chemické bateriové systémy (olověné akumulátory, alkalické akumulátory, lithium iontové akumulátory, redoxní průtokové baterie, vysokofrekvenční akumulátory).

V závislosti na dělení jsou při stávajících možnostech technologie pro použití akumulace energie z FV systémů vhodné pouze chemické bateriové systémy, případně akumulční zásobníky na teplou vodu. Základní struktura komerčně využívaných baterií má podobu konstrukce počítačového serveru, kdy jsou články zasunuty do „zástrček“ a mohou se rozšiřovat (zvyšování kapacity a výkonu). V základu mívá bateriová jednotka většinou kapacitu přibližně 2 až 3 kWh o napětí 48 V. Bateriová jednotka bývá obvykle složena z jednotlivých článků pospojovaných do sebe sériově nebo paralelně podle potřeby výstupních hodnot. Další částí uložště je nabíječ, buď ze sítě nebo z FV systému. V případě dobíjení z FV systému je nabíječ opatřen tzv. MPP trackerem (sledovač maximálního bodu výkonu). Výstup z baterie je připojen do střídače pracujícího paralelně se sítí.

Při výběru vhodné baterie je třeba se řídit právě jejich parametry:

- Ekonomika provozu – dostatečně vykrývat špičky v provozu, tím lze ušetřit
- Úspora energie z FV systému – je třeba vypočítat zisk z baterie, rozdíl mezi cenou přebytečné energie z FV systému uložené v akumulátoru vs přebytečná energie prodaná do sítě
- Kapacita baterie – určuje mi soběstačnost domu z FV systémem
- Cyklická životnost – je to velmi důležitý parametr závislý na hloubce vybití baterie
- Kalendářní životnost – baterie pozvolna stárne a degraduje, dnes je snaha o co nejdelší životnost, životnost baterie se snaží dosáhnout na životnost celého FV systému, což je zhruba 20 let i více. [22]

6.1 Možné typy baterií pro FV systémy

6.1.1 Nikl-kadmiová baterie

Jmenovité napětí jednoho článku je 1,2 V, v plně nabitém stavu dosahuje 1,35 V. Chemický vzorec katody je $2\text{Ni}(\text{OH})_2$. Její životnost dosahuje 2000 cyklů. Energetická hustota 40 až 60 Wh/kg. [22]

Je typ alkalické baterie. Tyto baterie mají velkou životnost a jsou takřka nezničitelné. Nevýhodou je však to, že je třeba do nich dolévat destilovanou vodu, mají malou hustotu energie a podléhají přísným ekologickým normám, kvůli karcinogennímu kadmii, a navíc nikl způsobuje kožní senzitivitu a alergické reakce, proto se téměř nepoužívají. [22]

6.1.2 Olověné baterie

Jmenovité napětí jednoho článku je 2,1 V, v plně nabitém stavu dosahuje 2,35 V. Chemický vzorec katody je PbSO_4 . Její životnost dosahuje 500 až 800 cyklů. Energetická hustota 30 až 40 Wh/kg. [22]

Olověné akumulátory byly dříve nejrozšířenější a nejpoužívanější. Zejména kvůli levné výrobě, a tudíž i nízkým pořizovacím nákladům. Svého času měly i dobré charakteristiky, ale s nástupem Li-ion akumulátorů se začínají méně a méně používat. Na trhu je drží právě jejich nízká cenová dostupnost. Stále se hojně využívají jako startovací akumulátory kvůli tomu, že po krátkou dobu zvládají dodávat vysoký proud. Dále se používají jako trakční baterie pro pohon elektrických vysokozdvížných vozíků a další manipulační techniky, ale i tam je jejich použití na ústupu. V dnešní době jsou různě modifikovány a je u nich rozšiřována hloubka vybití, prodlužována délka životnosti, která dosahuje dnes až 10 let. Nicméně olověné akumulátory vyžadují údržbu, při použití v uzavřených prostorech je třeba tyto prostory odvětrávat, protože mohou produkovat směs vodíku a kyslíku, hrozí tedy nebezpečí výbuchu. Mají celkem nízkou gravimetrickou hustotu, proto zaberou poměrně dost místa. Jejich použití pro FV systém je tedy na zvážení, pokud se snažíme pořídit co nejlevnější FV systém s akumulátorovým uložištěm a nevedí nám značné nevýhody tohoto typu akumulátoru, jsou pro nás vhodnou volbou.

6.1.3 Lithium iontové baterie

Hlavní výhodou těchto akumulátorů je vysoké napětí, velká gravimetrická hustota až 260 Wh/kg. Dalšími výhodami jsou vysoká účinnost až 95 %, malé samovybití do 5 % za měsíc, široká možnost optimalizace k danému použití, vysoká životnost podle technologie použití (až tisíce cyklů), neobsahují těžké kovy a nepotřebují údržbu. Omezujícím faktorem je potenciální nedostupnost lithia (omezené množství na Zemi), a hlavně špatná dostupnost z pohledu geopolitického. Další nevýhodou je jejich vysoká pořizovací cena, kvůli této vyšší cenové hladině se stále ještě hojně používají právě i olověné akumulátory. Hlavní rozdíl oproti olověným akumulátorům je ten, že mají výrazně lepší gravimetrickou hustotu, zabírají tedy méně místa a jsou lehčí, mají vyšší napětí, lepší hloubku vybití, a hlavně delší životnost. Mezi akumulátory pro FV systémy jsou však podle dnešní dostupnosti technologií nejvhodnější, a tudíž jsou dnes i nejpoužívanější.

6.1.3.1 NMC

Lithium Nikl Mangan Kobalt Di-Oxidová baterie. Jmenovité napětí jednoho článku je 3,7 V, v plně nabitém stavu dosahuje 4,2 V. Chemický vzorec katody je LiNiMnCoO_2 . Její životnost dosahuje 1000 až 4000 cyklů. Energetická hustota 140 až 210 Wh/kg. [22]

Tento typ akumulátoru je nejpoužívanějším typem pro elektromobilitu, hlavním výrobcem je Tesla Powerwall, která vyrábí modifikaci i pro FV systémy. Provozní výhodou této technologie je postupně a plynule se snižující napěťová křivka, což je výhodou pro kontrolní systémy baterie, tudíž lze dobře odhadnout např. dojezd automobilu. [22] Mají poměrně dobrou cyklickou životnost a vysoké napětí.

6.1.3.2 LFP

Lithium Železo Fosfátová baterie. Jmenovité napětí jednoho článku je 3,2 V, v plně nabitém stavu dosahuje 4 V. Chemický vzorec katody je LiFePO_4 . Její životnost dosahuje 2000 až 4000 cyklů. Energetická hustota 100 až 130 Wh/kg. [22]

Tento typ chemismu je prosazován hlavně v Číně a celé Asii, kvůli tomu, že nevlastnili patent na výrobu NMC. Používají se tedy u FV elektráren, ale i u levnějších elektromobilů. Mají dokonce i vyšší cyklickou životnost než NMC a s jsou cenově dostupnější. Značnou nevýhodou je plochá vybíjecí křivka. [22]

6.1.3.3 LTO

Lithium Titanátová baterie. Jmenovité napětí jednoho článku je 2,4 V, v plně nabitém stavu dosahuje 2,8 V. Chemický vzorec katody je $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Její životnost dosahuje neuvěřitelných 6000 až 12000 cyklů. Energetická hustota 60 až 90 Wh/kg. [22]

Tyto baterie jsou schopné pojmout i dodat velmi vysoké proudy, je nutné však baterie při vyšší zátěži chladit. Mají velmi vysokou cyklickou životnost a jsou naprosto bezúdržbové, proto se používají v odlehlých oblastech pro vysílačky, majáky atd. Hlavní nevýhodou jejich vysoká pořizovací cena. Proto se pro aplikaci FV systému v rámci použití pro domácnost nehodí. [22]

6.1.4 Sodík-iontová baterie

Sodík je alkalický kov, který je běžně dostupný prvek hojně se vyskytující v zemské kůře. Sodík-iontová baterie je zatím objekt pro bádání, ale v budoucnu by měla nahradit Lithiové baterie, je to tedy velice slibný koncept. Právě díky dostupnosti sodíku by takové baterie mohly mít nízké pořizovací náklady. První prototypy těchto baterií neztráceli vůbec kapacitu, po 500 cyklických nabíjení a vybíjení. Zvládali dvakrát rychlejší nabíjení než lithiové akumulátory, ale značnou nevýhodou byla jejich nízká kapacita. Nicméně je to zajímavá vize budoucnosti.

7. VYHODNOCENÍ TRHU V ČR

Celosvětově jsou obnovitelné zdroje podporovány. Jednotlivé státní uskupení si dávají za cíle snížit množství emisí v atmosféře, a dosáhnout tak uhlíkové neutrality. Evropská unie chce tedy do roku 2050 dosáhnout klimatické neutrality, a jelikož je Česká republika nedílnou součástí EU, snaží se různě podporovat obnovitelné zdroje, mezi které patří právě i fotovoltaika.

Na podporu fotovoltaiky v ČR byl ustanoven zákon č. 165/2012 Sb., díky kterému prudce klesla pořizovací cena fotovoltaických panelů, a zrychlila se tak návratnost investice. Dříve byla myšlenka podpory FV postavená trochu jiným směrem. Hlavní podporou FV ze strany vlády byla poměrně vysoká a garantovaná cena výkupu elektrické energie z FV elektráren, dnes je výkup ponížen a není nijak dotován, takže se energii nevyplatí prodávat do sítě. V dnešní době se tedy podporuje energetická soběstačnost. Tzn. vyrobená energie se v co největší míře spotřebuje, případné přebytky uloží a až v poslední možnosti prodá do sítě. Nový dotační program s názvem Nová zelená úsporám přispívá tedy pouze na nákup systému, který ale musí splňovat určité parametry. Další podporou ze strany státu pro malé FV elektrárny je vznik novely energetického zákona č. 131/2015 sb. účinné od 1.1.2016, která umožňuje provozovat výrobu elektrické energie s instalovaným výkonem do 10 kWp bez licence na výrobu elektřiny. [23] Je možné tedy bez licence a dalších problémů s legislativou dodávat přebytečnou elektřinu z vlastního systému do sítě za dodržení daných podmínek.

Celkově fotovoltaika v ČR oproti ostatním státům zaostává, je to nejspíše dáno dřívější špatně cílenou a nastavenou podporou, která dala prostor pro tzv. „spekulanty“ kvůli vysoké ceně výkupu. Česká fotovoltaika se tak stala pro investory nezajímavou. Dnes je ale česká fotovoltaika na vzestupu díky správně cílené podpoře a krátké době návratnosti investice. Podíl vyrobené elektřiny z FV systému za rok 2019 v rámci celé ČR byl zhruba 2,6 %, to odpovídá zhruba 2,339 TWh. Ročně se v ČR instalují elektrárny v celkovém výkonu zhruba 25 MW. Stávající výkon FV systémů v roce 2020 v rámci ČR je tedy necelých 2100 MWp. [24]

7.1 Nová zelená úsporám

Ministerstvo životního prostředí ČR za spolupráce Státního fondu životního prostředí podporuje mimo jiné i fotovoltaiku dotací Nová zelená úsporám, která je zaměřena na úsporu energií v rodinných a bytových domech. Všeobecně podporuje zateplení, výměnu oken a dveří u starších domů, výstavbu a koupi nového rodinného domu s velmi nízkou energetickou náročností a obnovitelné zdroje energie. Dotace na obnovitelné zdroje energie zahrnují dotace na solární termické a fotovoltaické systémy, řízené větrání se zpětným získáváním tepla (rekuperace), výměnu zdrojů tepla. Program Nová zelená úsporám byl spuštěn v roce 2014 a ukončení příjmu žádostí je nejpozději do 31.12.2021 nebo do vyčerpání stanovené alokace. Na toto období bylo do programu alokováno 17,2 mld. Kč. [25]

Z našeho pohledu nás tedy primárně zajímá dotace solárních FV systémů, která má za úkol podpořit rozvoj a výstavbu FV systémů pro rodinné domy a soukromé subjekty. Pro dosažení dotace je třeba splnit podmínky, které jsou níže popsány. Je třeba také dodržet závazné pokyny, tyto pokyny jsou v průběhu programu aktualizovány a je tedy třeba se vždy držet aktuálních pokynů v daném období.

7.1.1 Podmínky přidělení dotace po instalaci FV systému

O dotaci mohou žádat vlastníci nebo stavebníci rodinných domů, jak fyzické osoby, tak právnické osoby. Žádost o dotaci se podává výhradně elektronicky prostřednictvím online formuláře. Žádat se může před zahájením, v průběhu nebo po dokončení prací. Výše dotace pro FV solární systémy je v rozmezí 35 000 – 150 000 Kč. Získat se může až 50 % celkových způsobilých výdajů, nejvýše 350 000 Kč. Dotace je vázána na rodinný dům jedenkrát, ne na osobu. [26]

7.1.2 Podmínky pro propojení FV systému s distribuční soustavou

- Maximální výkon instalovaného FV systému nesmí být vyšší než 10 kWp.
- Podpora pouze pro nové systémy.
- Systém instalován pouze na stavbě evidované v katastru nemovitostí.
- Systém musí být opatřen měničem s minimální účinností 94 % nebo pokud jde o „hybridní měnič“ určený pro přeměnu DC energie z akumulátoru na AC energii, připouští se minimální účinnost 92 %.
- Minimální účinnost FV panelů garantovaná výrobcem musí být:
 - 15 % u mono- a polykrystalických panelů
 - 10 % u tenkovrstvých amorfních panelů
 - Bez požadavku u střešních FV krytin a fasádních systémů (mimo plošné kolektory)
- Nesmí se používat olověné startovací akumulátory a Ni – Cd akumulátory.
- Míra využití vyrobené elektřiny pro pokrytí spotřeby v místě výroby musí být alespoň 70 % z celkového zisku systému. [26]

Tab. 7.1 Požadované parametry na FV systém a výše dotační podpory [26]

Typ systému a požadované parametry	Výše podpory [Kč/ dům]
FV systém pro přípravu teplé vody s přímým ohřevem	35 000
FV systém bez akumulace elektrické energie s tepelným využitím přebytků do teplé vody (min. objem zásobníku na vodu 120 l) a celkovým využitelným ziskem $\geq 1\,700$ kWh/rok	55 000
FV systém s akumulací elektrické energie (min. měrná kapacita akumulátoru 1,75/1,25 kWh/kWp) a celkovým využitelným ziskem ≥ 1700 kWh/rok	70 000
FV systém s akumulací elektrické energie (min. měrná kapacita akumulátoru 1,75/1,25 kWh/kWp) a celkovým využitelným ziskem ≥ 3000 kWh/rok	100 000
FV systém s akumulací elektrické energie (min. měrná kapacita akumulátoru 1,75/1,25 kWh/kWp) a celkovým využitelným ziskem ≥ 4000 kWh/rok	150 000
FV systém efektivně spolupracující se systémem vytápění a přípravy teplé vody s tepelným čerpadlem (min. objem zásobníku na vodu 600 l)	150 000
FV systém bez akumulace elektrické energie s tepelným využitím přebytků (min. objem zásobníku na vodu 200 l) a celkovým využitelným ziskem $\geq 3\,000$ kWh/rok	80 000

8. NÁVRH FV ELEKTRÁRNY PRO KONKRÉTNÍ RODINNÝ DŮM

Úkolem této práce je navrhnout optimální FV elektrárnu pro rodinný dům. Vzhledem k vybrané lokalitě je třeba systém dobře navrhnout a optimalizovat, aby byl dostatečně účinný v horších světelných podmínkách, které panují na Jihlavsku. Proto je důležité, jaká technologie FV panelů bude u návrhu použita.

Práce tedy dle zadání pojednává o třech variantách návrhu fotovoltaiických systémů. První návrh používá monokrystalické panely, druhý návrh polykrystalické panely a třetí návrh tenkovrstvé panely.

Všechny tři návrhy používají stejný střídač, stejnou baterii a stejný instalovaný výkon, to proto, aby vynikl co nejvíce rozdíl mezi jednotlivými typy panelů. Hlavním úkolem je tedy porovnat účinnost jednotlivých panelů, zvolit kritéria jednotlivých systémů a vybrat systém, který bude pro danou lokalitu nejlepší. K tomuto porovnání je využíváno multikriteriální analýzy.

Praktická část této práce tedy cílí na účinnost jednotlivých typů panelů v oblasti, kde převažuje difuzní složka záření kvůli časté oblačnosti a vysokému úhrnu srážek v místě návrhu. Je vždy ale potřeba brát v potaz i cenu jednotlivých panelů, která pro případného investora bývá často rozhodující. Proto bylo potřeba dobře zmapovat ceny na trhu s FV systémy.

V rámci návrhu FV systému je počítáno i s životností jednotlivých komponent zvlášť a životností celého systému, která je uvažována podle životnosti panelů a to na 25 let. Návrh tedy řeší i další možné investice do obnovy FV systému.



Obr. 8.1 Dům pro návrh FV systému

8.1 Lokalita

Dům se nachází na Vysočině, okres Jihlava, v obci Luka nad Jihlavou. Dům je umístěn ve staré zástavbě v centru obce. Je zde mnoho vysokých domů a objektů, které vrhají stíny na vybraný dům. Od západu zastiňuje vybraný dům kostel.

8.2 Popis domu

Jedná se o starý rodinný dům, kde jsou zřízeny 2 bytové jednotky. Celkem zde bydlí 3 osoby. Dům je obdélníkového půdorysu (9,846 m x 18,259 m) s valbovou střechou. K domu náleží hospodářská budova s garáží taktéž obdélníkového půdorysu s valbovou střechou. Výška domu je 11,82 m, výška hospodářské budovy je 6,62 m. Dům je vytápěn plynovým kotlem. Ohřev teplé vody pro domácnost je pomocí elektrického bojleru. Roční spotřeba elektrické energie je zhruba 6436 kWh. Majitel domu má sjednané smlouvy na dodávku elektřiny od firmy E.on, a nastavený platební tarif d02d, kdy je cena energie 4,5 Kč za 1 kWh. Návrh počítá s prodejem přebytečné energie z FV systému, průměrná cena na trhu v ČR je 0,8 Kč za 1 kWh, musela by se však upravit smlouva s distributorem.

Tab. 8.1 Rozpis jednotlivých spotřebičů a jejich roční spotřeba

Typ spotřebiče	Průměrná doba použití za den [h]	Energie [kWh/rok]
2 osoby v 1. bytě (světla, teplá voda a další drobné spotřebiče)	x	3304
1 osoba v 2. bytě (světla, teplá voda a další drobné spotřebiče)	x	2287
Televize	2	38
Počítač	2	55
Pračka 40°	1	438
Lednice	24	250
Vysavač	1	65
Celkem		6436

8.3 Výběr systému pro návrh

Výběr systému pro návrh a následnou simulaci nebyl nikterak složitý. Hlavním požadavkem při výběru systému byla jeho cenová dostupnost, možnost 3D návrhu, simulace výtěžnosti návrhu v dané lokalitě a v neposlední řadě možnost ekonomického výpočtu a návratnosti systému. Ze zdarma dostupných návrhových systémů se nabízí PV*SOL, FVE, SAM. Systémy FVE a SAM nepodporují 3D modelování, proto padla volba na návrhový systém PV*SOL, který umožňuje 30. denní bezplatnou licenci. Navíc po rok 2021 vyšla i česká verze systému.

8.4 Návrh fotovoltaických systémů

Požadavkem bylo navrhnout třífázový systém, protože je celý dům připojen do třífázové soustavy a nevyplatilo by se přepojovat celý dům na jednu fázi. Systém musí být v zapojení ON-GRID s bateriovým uložištěm. Ukládání přebytku energie by bylo možné také do teplé vody. Musel by se však pořídit větší bojler a další regulace pro přepínání mezi ohříváním bojleru ze sítě a z FV systému, což by zvýšilo další náklady. Proto je v návrhu použita dostatečně velká baterie, aby se dohřívání bojleru mohlo vykrývat i ve večerních hodinách, kdy je spotřeba teplé vody vyšší než v době zisku s FV elektrárny. Ukládání přebytků energie do teplé vody se proto v návrhu neuvažuje.

Hlavními cíli bylo získat dotaci Nová zelená úsporám, dosáhnout co nejvyššího výkonu pro pokrytí spotřeby, docílit částečné soběstačnosti pro případ výpadku elektřiny a snažit se o co nejnižší pořizovací náklady. V lokalitě, kde se dům nachází jsou časté srážky, a ne vždy úplně dobrý sluneční svit, navíc je dům v husté zástavbě. Proto bylo potřeba umístit panely na místo s nejnižším možným zastíněním.

Výhoda domu je, že štít je směřován na jih a z jihu nestíní žádný objekt. Další části domu jsou nevhodné pro instalaci z důvodu přílišného zastínění.

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, níže jsou popsány tři návrhy, každý návrh má však stejný základ a liší se v použitých panelech, nejprve jsou tedy popsány totožné komponenty.

8.4.1 Trojrozměrné modelování

Nejprve bylo potřeba pro 3D návrh změřit rozměry domu, k domu neexistují žádné plány. V návrhovém systému byla zadána lokalita pomocí satelitních map a umístění domu. Po nastavení požadovaných údajů si systém stáhl meteorologická data z let 1991 až 2010. Byla využita možnost importovat satelitní snímky z Google Maps a podle fotek přesně navrhnout rozmístění budov, správnou orientaci podle světových stran a přesné vzdálenosti jednotlivých budov. Terén nebylo třeba upravovat, návrhové místo je na rovině. Pro lepší vizualizaci je navrhovaný dům nafocen a fotky importovány na příslušné stěny domu. Původní záměr byl vytvořit 3D model domu v externím návrhovém systému Autodesk a poté tento model importovat do systému PV*SOL. Tento krok 3D rozhraní PV*SOL umožňuje, celý návrh FV systému a simulace to ale značně zpomalilo, proto bylo vhodnější využít pouze rozhraní PV*SOL.



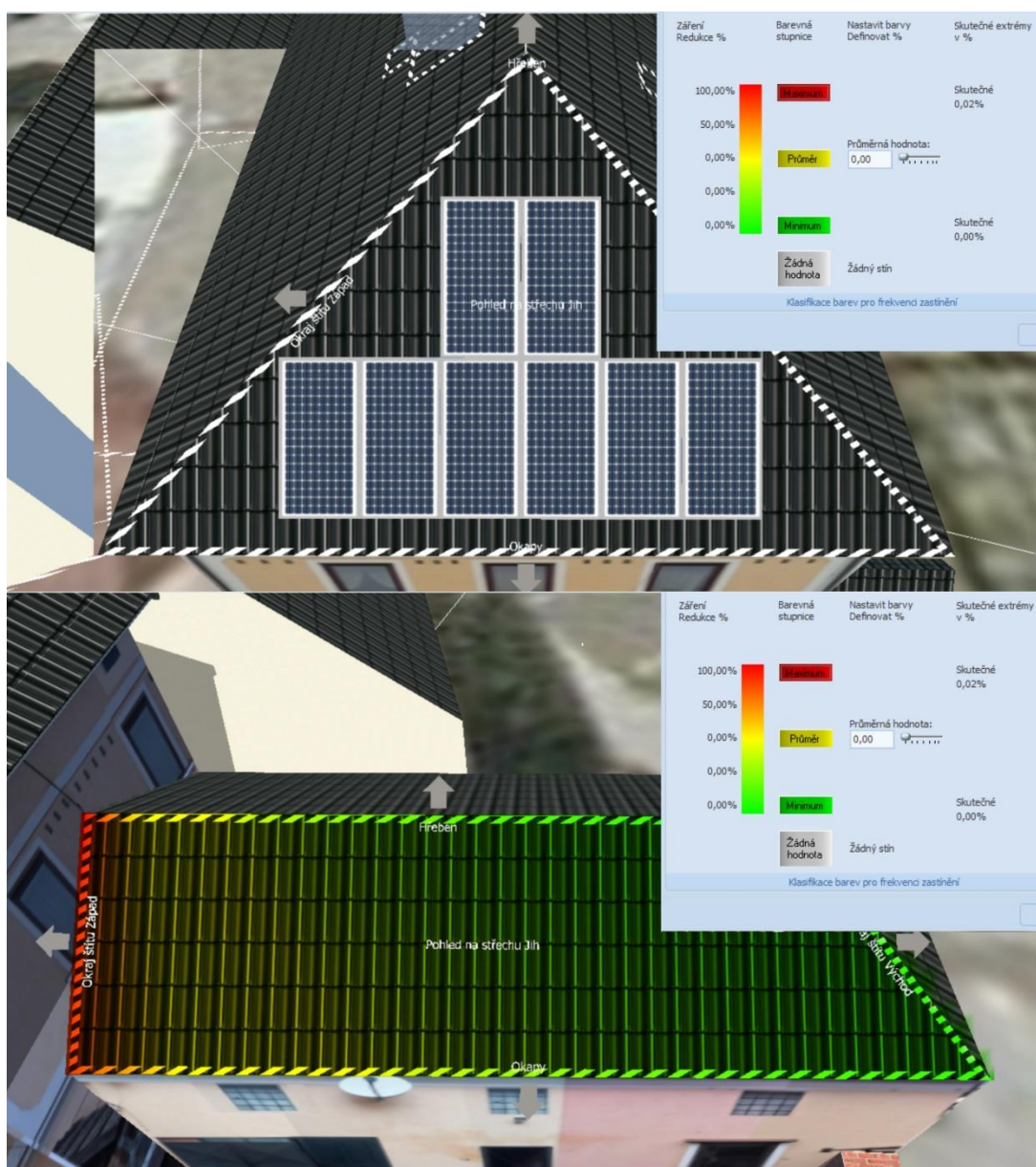
Obr. 8.2 Trojrozměrný návrh domu a okolí, pohled na dům



Obr. 8.3 Trojrozměrný návrh domu a okolí, letecký pohled na celé navržené prostředí

Následovala aktivace střechy v programu. Modelace střechy, přesahy střechy, textura krytiny střechy, umístění komínů a střešních oken. Vše bylo navrženo dle naměřených reálných hodnot domu pro navození co nejreálnějších podmínek a možnou simulaci vrhání stínů. Díky tomu, že návrhový systém dokáže simulovat zastínění ploch, bylo jasné, že nejvhodnější je jižní štít střechy na domě, jižní střecha hospodářské budovy je nevhodná, protože budova je příliš nízká a ostatní objekty ji zastíňují.

Na obrázku 8.4 je vidět rozdíl. Místo, kde je střecha nejvíce červená je nejvíce zastíněno, přes žlutou až k zelené, kde je minimální zastínění. Jak je ale vidět, střecha s instalovanými panely nemá žádný odstín červené a zelené, zastínění od okolních objektů totiž není skoro žádné.



Obr. 8.4 Porovnání zastínění střechy s umístěnými panely a střechy hospodářské budovy, obě střechy jsou směrem k jihu

8.4.2 Výběr střídače pro všechny návrhy

Pro dodržení podmínek dotačního programu, bylo nutné vybrat střídač s účinností převyšující 92 %. Také je třeba se držet pravidel pro optimální návrh FV systému v ČR, kde se elektřina nakupuje podle jednotlivých fází, střídač tedy musí být schopen dodávat energii do jednotlivých fází asymetricky, jak již bylo popsáno v teoretické části této práce.

Jako nejvhodnější se jeví tedy hybridní střídač, který dokáže i dobře využívat akumulátor. Na trhu je celá řada střídačů, dobré parametry pro zmíněné požadavky má střídač Fronius Symo Hybrid 3.0-3-S. Jeho účinnost v navrženém systému při 100 % vytižení dosahuje 97,7 %. Tento střídač obsahuje i nabíjecí regulátor pro baterii, což ušetří i další náklady. Stačí baterii připojit ke střídači a on vše reguluje (nabíjení i vybíjení baterie). Tento střídač má jednoduchý montážní systém. Také je střídač možno připojit k internetu, je možné tak nastavovat a sledovat toky energií přes internet. Další zajímavou vlastností střídače je možnost nabíjet akumulátor i ze strany AC, dobíjení baterie z již instalovaného staršího FV systému nebo je možné systém rozšířit o vodní nebo větrnou turbínu.

Tab. 8.2 Údaje o použitém střídači Fronius Symo Hybrid 3.0-3-S [27]

Údaj o střídači	Hodnota	Jednotka
Rozměry	645 x 431 x 204	mm
Hmotnost	19,9	kg
Krytí	IP 65	-
Maximální účinnost	97,7	%
Evropská průměrná účinnost	95,2	%
Počet MPPT	1	-
Maximální DC výkon	5	kW
DC vstupní napětí	150 až 1000	V
Počet DC vstupů	2	-
Maximální zkratový proud na panelech	24	A
Nominální AC výstup	3	kW
Maximální AC výstupní výkon	3	kVA
Maximální energie pro připojenou baterii	3	kVA
Maximální výstupní proud	8,3	A
Připojení do sítě	3~NPE 400 V	-
Záruka po registraci u výrobce	7	let
Uvažovaná životnost	21	let
Cena	48 343	Kč (včetně DPH)

8.4.3 Výběr akumulátoru pro všechny návrhy

Li-ion akumulátory jsou sice dražší, ale mají větší životnost. Bylo tedy rozhodnuto, že se i přes výrazné navýšení celkových nákladů použije Li-ion akumulátor. Vzhledem k požadavku na částečnou soběstačnost bylo na místě zvolit akumulátor s dostatečnou kapacitou. Takovýto akumulátor je ale poměrně velký pro instalaci v domě. K domu náleží malá, nyní již nevyužívaná budova, která by byla vhodná pro umístění akumulátoru. Objekt leží mimo budovu rodinného domu, ale velmi blízko domovnímu elektrickému rozvaděči. Veškeré bezpečnostní požadavky na akumulátorovnu by tato stavba splňovala.

Vybraný akumulátor je od firmy Huawei s označením Luna2000-5-S0. Jedná se o Lithium železo fosfátovou baterii (LiFePO_4) u které je obecně velikou výhodou bezpečnost a schopnost dodávání vysokého proudu při špičkovém odběru. Tento akumulátor lze dodatečně rozšířit o další moduly a zvýšit tak celkovou kapacitu a to až do 30 kWh.

Tab. 8.3 Údaje o použitém akumulátoru Huawei Luna 2000-5-S0 [28]

Údaj o panelu	Hodnota	Jednotka
Rozměry	670 x 150 x 600	mm
Hmotnost	63,8	kg
Kapacita akumulátoru	5,12	kWh,
Napětí akumulátoru	51,2	V
Napětí článku	3,2	V
Stupeň krytí	IP 65	-
Počet článků baterie	16	-
Maximální vybíjecí výkon	2,5	kW
Účinnost	95	%
Samovybíjení za měsíc	1,5	%
Garantovaná životnost	15	let
Cena	84 181, 66	Kč (včetně DPH)

8.5 Návrh systému s monokrystalickými panely

Monokrystalické panely jsou na dnešním trhu a při většině instalací nejrozšířenější a jejich cena se neustále snižuje. Pořád jsou ale dražší než polykrystalické panely. Za to mají nejvyšší instalovaný výkon se zatím vyráběných technologií. Jak již bylo v teoretické části zmíněno, tento typ panelů je vhodný pro přímou složku slunečního záření. Tyto panely jsou použity při návrhu fotovoltaického systému s monokrystalickými panely (dále jako FVS MONO).

8.5.1 Výběr FV panelů pro FVS MONO

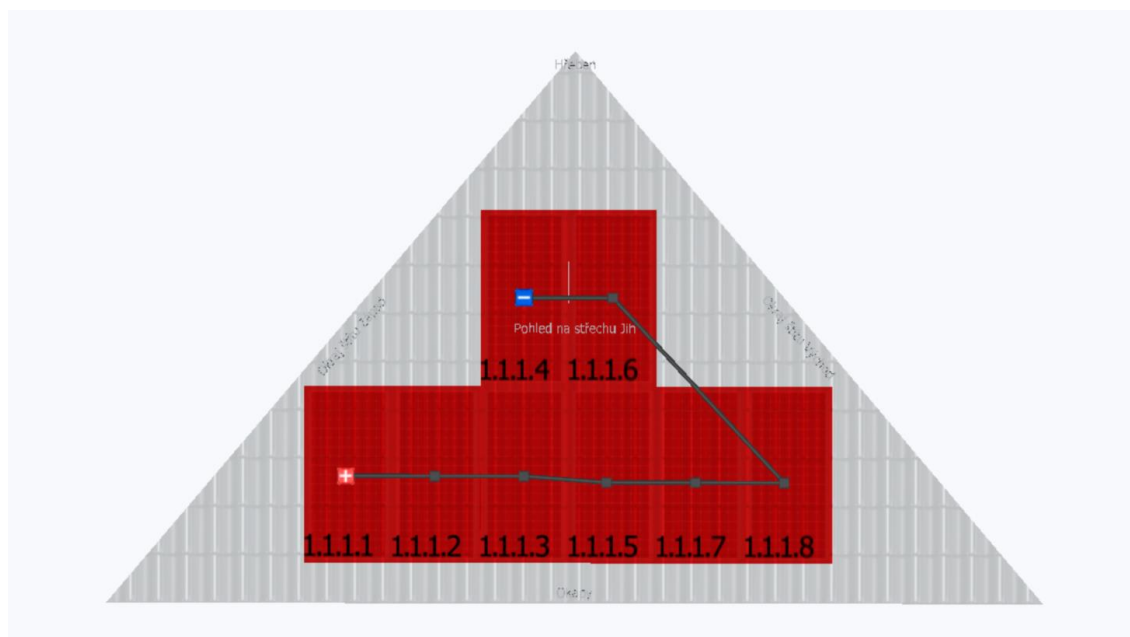
Jelikož jsou rozměry vhodné plochy střechy domu pro instalaci FV panelů značně omezeny a je třeba se držet přání zákazníka, dosáhnout co možná největšího výkonu, bylo rozhodnuto využít monokrystalické solární panely s výkonem 400 Wp, výběr pak byl dle nejlepších možných parametrů a ceny a hlavně dostupnosti v ČR. Jedná se o solární panely DAH 400 Wp (výrobní označení HCM72X9).

Tab. 8.4 Údaje o použitých modulech HCM72X9 [29]

Údaj o panelu	Hodnota	Jednotka
Rozměry	2010 x 1002 x 35	mm
Hmotnost	23	kg
Účinnost	19,87	%
Počet článků	144 (6*24)	Ks
Špičkový výkon	400	Wp
Proud při maximálním výkonu	9,86	A
Zkratový proud	10,32	A
Napětí při maximálním výkonu	40,6	V
Napětí bez zátěže	49	V
Odolnost mechanického zatížení	5400	Pa
Dálka propojovacího 4 mm ² kabelu	30	cm
Účinnost po 25 letech provozu	83,2	%
Cena	3 628	Kč (včetně DPH)

8.5.2 Instalace a zapojení FVS MONO v návrhovém systému

Rozměry střechy umožňují instalaci 8 panelů. Rozměry střechy s rozmístěním panelů najdeme v Příloze A. Instalovaný výkon panelů činí 3,2 kWp. Panely jsou umístěny vertikálně, kopírují sklon střechy 38°. Tyto panely jsou v jednom stringu a jsou zapojeny do série, jak ukazuje Obr. 8.5.



Obr. 8.5 Zapojení FVS MONO ve stringu

V návrhu již není zakresleno kde přesně bude instalován elektrický rozvaděč celého systému a umístění střídače a baterie. Je uvažováno, že veškerá elektroinstalace by byla právě v akumulátorovně. Na střeše pro propojení FV modulů je potřeba 8 m vodiče a dalších asi 20 metrů vodiče je třeba na přívod do akumulátorovny. Zjednodušené schéma zapojení celého systému se nachází v Příloze C.

8.5.3 Celkové investiční náklady na FVS MONO

Systém počítá s 50 % dotací Nová zelená úsporám, na kterou dosáhne díky splnění požadavků dotačního programu. Do návrhu je zanesena cena za montáž, je to čistě orientační cena, podle instalovaného výkonu a trhu by však měla odpovídat reálným nákladům.

Tab. 8.5 Rozpis položek systému s monokrystalickými panely a jejich cena

Položka	Doba použití [roky]	Částka včetně DPH [Kč]
8 x Monokrystalický panel HCM72X9	30	29 024
Střídač Fronius Symo Hybrid 3.0-3-S	21	48 343
Akumulátor Huawei Luna 2000-5-S0	15	84 182
Kabeláž, konektory	30	2 000
Elektrický rozvaděč	30	4 000
Elektroměry	30	4 000
Práce + nosná konstrukce	30	20 000
Cena celkem		191 549
Cena po odečtení dotace		95 775

8.5.4 Shrnutí celkových výsledků a parametrů navrženého FVS MONO

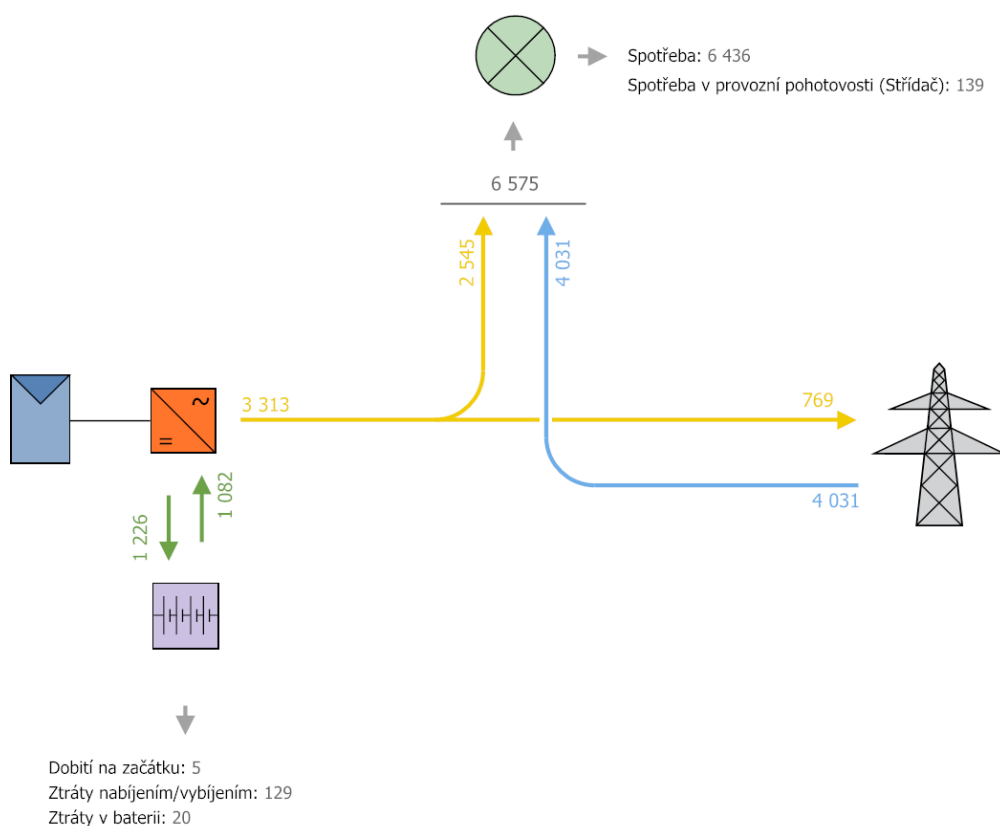
V tabulce 8.6 je vidět, že díky stupni využití převyšující požadovanou mez 70 %, s celkovým využitelným ziskem přesahující 1700 kWh/rok a za požití akumulátorového uložení, navrhovaný systém splňuje veškeré podmínky pro dosažení dotace Nová zelená úsporám. Výše dotace je kalkulována v hodnotě 95 775 Kč.

Ze zjištěných výsledků je také zajímavá roční úspora dosahující 11 440 Kč a také fakt, kolik je možné ušetřit na emisích CO₂.

Dle předpokládané životnosti zařízení by se náklady na takovýto systém zaplatily již v průběhu 9. roku používání, dále by mohl systém vydělávat a zaplatily by se další investice na prodloužení životnosti celého systému (např. nákup baterie, výměna poškozených komponent atd.). Kumulativní finanční tok je možné prohlédnout v Příloze F.

Tab. 8.6 Shrnutí hlavních parametrů navrženého FVS MONO

Parametr	Hodnota	Jednotka
Instalovaný výkon	3,2	kWp
Celkový výnos FV zařízení s baterií za rok	3 313	kWh
Celkové množství vlastní spotřeby za rok	2 545	kWh
Množství dodané energie do sítě za rok	769	kWh
Množství nakoupené energie ze sítě za rok	4 031	kWh
Celková energetická spotřeba domu za rok (+ střídač)	6 575	kWh
Celková spotřeba střídače za rok (povýšení spotřeby)	139	kWh
Stupeň využití zařízení	84,1	%
Snížení výnosu zastínění za rok	0,5	%
Podíl pokrytí solární energií (soběstačnost)	38,7	%
Podíl vlastní spotřeby	75,8	%
Celková kapitálová rendita	9,70	%
Snížení emisí CO ₂ za rok	1 422	kg
Vlastní výrobní náklady elektrické energie	2,87	Kč/kWh
Celkové výnosy a úspory za rok	11 440,3	Kč



Obr. 8.6 Grafika toku energie FVS MONO

8.6 Návrh systému s polykrystalickými panely

Polykrystalické panely jsou levnější než monokrystalické panely, a přestože by jejich technologie měla být méně efektivní se jejich efektivita dostává na úroveň monokrystalických panelů. Obecně mívají nižší výkon než monokrystalické panely, ale na trhu se objevují již panely se stejným výkonem. Obecně by měly polykrystalické panely mít lepší účinnost při difuzní složce záření na což cílí právě analýza této práce. Tyto panely jsou použity při návrhu fotovoltaického systému s polykrystalickými panely (dále jako FVS POLY).

8.6.1 Výběr FV panelů pro FVS POLY

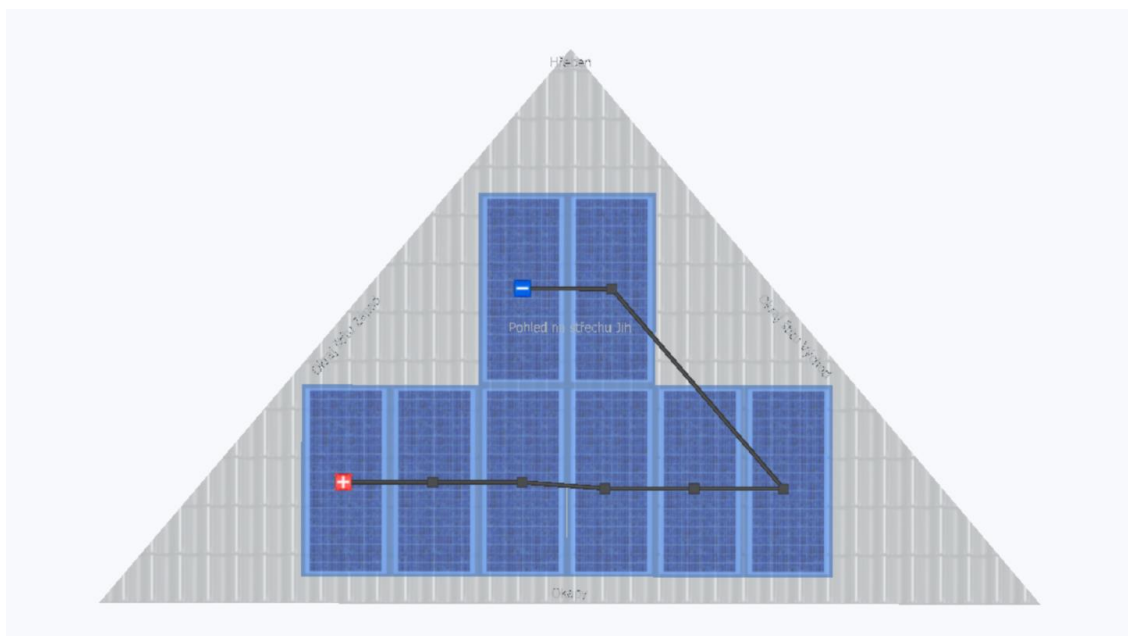
Návrh FVS POLY využívá stejnou plochu pro instalaci jako FVS MONO. Proto bylo potřeba vybrat panely s podobným výkonem. Společnost DAH Solar vyrábí polykrystalické panely dokonce i s výkonem 400 Wp, což je pro tuto technologii poměrně vysoký výkon. Jedná se o solární panely HCP78X9 400 Wp.

Tab. 8.7 Údaje o použitých modulech HCP78X9 [30]

Údaj o panelu	Hodnota	Jednotka
Rozměry	2172 x 1002 x 40	mm
Hmotnost	24,3	kg
Účinnost	18,38	%
Počet článků	156 (6*26)	Ks
Špičkový výkon	400	Wp
Proud při maximálním výkonu	9,35	A
Zkratový proud	9,87	A
Napětí při maximálním výkonu	42,8	V
Napětí bez zátěže	51,4	V
Odolnost mechanického zatížení	5400	Pa
Dálka propojovacího 4 mm ² kabelu	30	cm
Účinnost po 25 letech provozu	82,3	%
Cena	3 269	Kč (včetně DPH)

8.6.2 Instalace a zapojení FVS POLY v návrhovém systému

Rozměry střechy umožňují instalaci 8 panelů, stejně jako u FVS MONO. Rozměry střechy, rozmístěním panelů, sklon panelů a zapojení, všechny tyto hodnoty jsou totožné s předešlým návrhem. Rozmístění panelů odpovídá také Příloze A.



Obr. 8.7 Zapojení FVS POLY do série

Prívody do rozvodny by byly taktéž totožné z předchozím návrhem stejně tak schéma zapojení celého systému odpovídá Příloze C. Návrh se tedy liší pouze v použitých panelech, proto aby byly ztráty ve vedení totožné a vynikaly rozdíly pouze v technologii panelů.

8.6.3 Celkové investiční náklady na FVS POLY

Cenová kalkulace opět počítá s dotací 50 % a ceny jsou obdobné jako v předchozím návrhu. V tabulce 8.8 je vidět, že opět navrhovaný systém splňuje veškeré podmínky pro dosažení dotace Nová zelená úsporám. Výše dotace je kalkulována v hodnotě 94 339 Kč.

Tab. 8.8 Rozpis položek systému s polykrystalickými panely a jejich cena

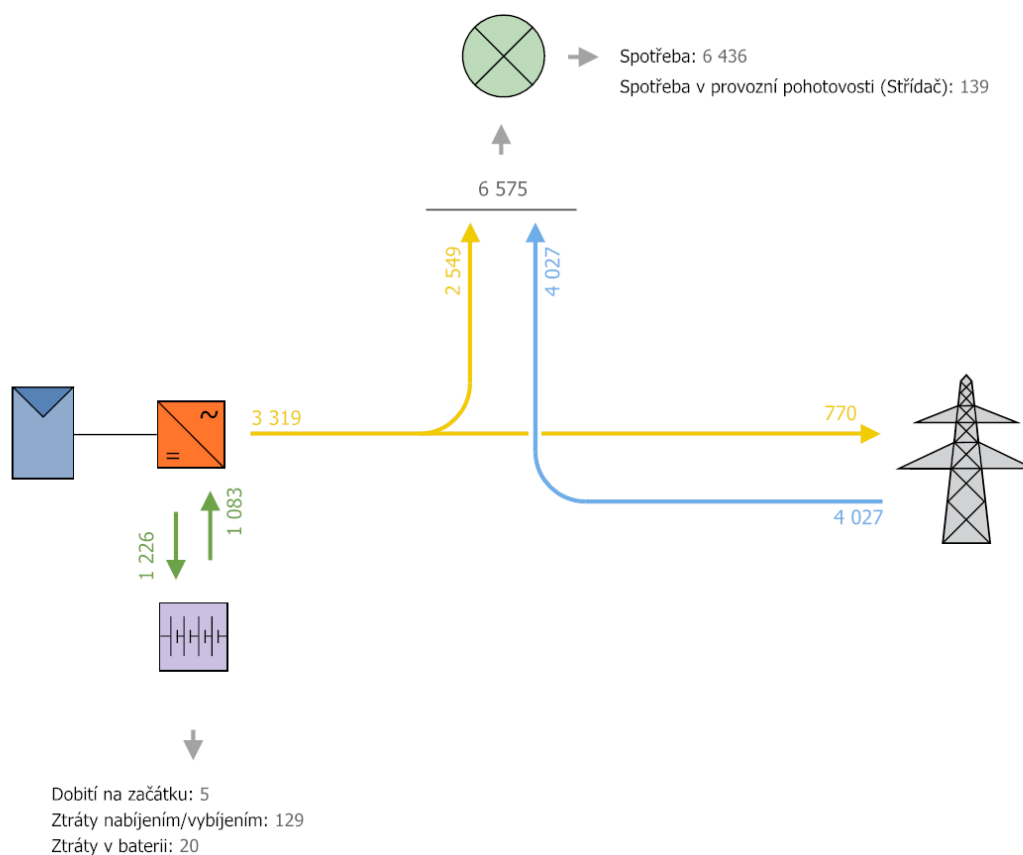
Položka	Doba použití [roky]	Částka včetně DPH [Kč]
8 x Polykrystalický panel HCP78X9	30	26 152
Střídač Fronius Symo Hybrid 3.0-3-S	21	48 343
Akumulátor Huawei Luna 2000-5-S0	15	84 182
Kabeláž, konektory	30	2 000
Elektrický rozvaděč	30	4 000
Elektroměry	30	4 000
Práce + nosná konstrukce	30	20 000
Cena celkem		188 677
Cena po odečtení dotace		94 339

8.6.4 Shrnutí celkových výsledků a parametrů navrženého FVS POLY

V tabulce 8.9 je vidět, že oproti FVS MONO je zde dosaženo mírného zlepšení téměř všech vynesných hodnot, což je u takovéto malé elektrárny v celku zajímavý výsledek. Návratnost systému je kalkulována na 8,1 roku, což je dobrá návratnost, obecně totiž platí, že každá návratnost pod deset let je vynikající. Celková cena oproti FVS MONO se nijak výrazně neliší.

Tab. 8.9 Shrnutí hlavních parametrů navrženého FVS POLY

Parametr	Hodnota	Jednotka
Instalovaný výkon	3,2	kWp
Celkový výnos FV zařízení s baterií za rok	3 319	kWh
Celkové množství vlastní spotřeby za rok	2 549	kWh
Množství dodané energie do sítě za rok	770	kWh
Množství nakoupené energie ze sítě za rok	4 027	kWh
Celková energetická spotřeba domu za rok (+ střídač)	6 575	kWh
Celková spotřeba střídače za rok (povýšení spotřeby)	139	kWh
Stupeň využití zařízení	84,3	%
Snížení výnosu zastínění za rok	0,4	%
Podíl pokrytí solární energií (soběstačnost)	38,8	%
Podíl vlastní spotřeby	75,8	%
Celková kapitálová rendita	9,95	%
Snížení emisí CO ₂ za rok	1 425	kg
Vlastní výrobní náklady elektrické energie	2,84	Kč/kWh
Celkové výnosy a úspory za rok	11 459,9	Kč



Obr. 8.8 Grafika toku energie FVS POLY

8.7 Návrh systému s amorfními panely

Jedná se o tenkovrstvé amorfní panely, konkrétně technologie CIS. Obecně mají tenkovrstvé panely daleko nižší účinnost než panely monokrystalické nebo polykrystalické. Jsou však lehčí, což může být výhodou pro některé instalace. Na trhu jsou ale kvůli své účinnosti a nízkému výkonu málo používané. To má za následek i to, že je jejich cena daleko vyšší, než je tomu u klasickým monokrystalických a polykrystalických panelů. Tyto panely jsou použity při návrhu fotovoltaického systému s tenkovrstvými amorfními panely (dále jako FVS CIS).

8.7.1 Výběr FV panelů pro FVS CIS

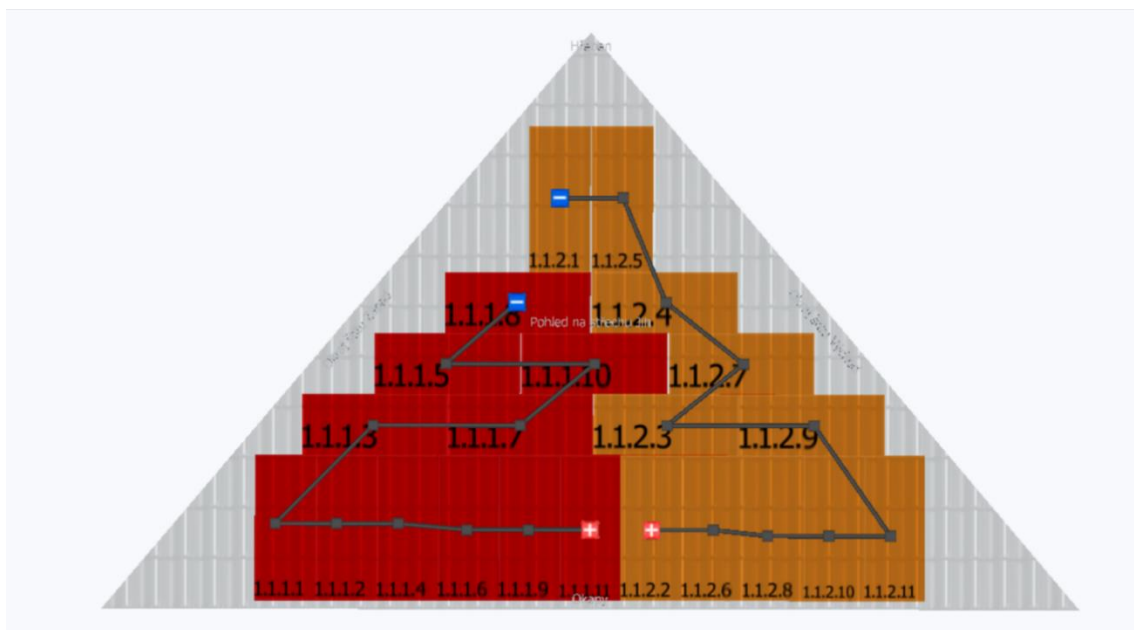
Návrh FVS CIS využívá stejnou plochu pro instalaci jako FVS MONO. Panely jsou však menší a bylo možné je lépe poskládat, tudíž se jich na stejnou střechu vešlo daleko více a dosahují tedy i podobného výkonu jako předešlé návrhy. Na trhu se většina CIS panelů pohybuje mezi výkony 100 Wp až 150 Wp, pro simulaci byl vybrán panel s výkonem 145 Wp, od firmy AVANCIS s označením PowerMax 4.0 145 W.

Tab. 8.10 Údaje o použitých modulech AVANCIS PowerMax 4.0 145 W [31]

Údaj o panelu	Hodnota	Jednotka
Rozměry	1587 x 664 x 38	mm
Hmotnost	17	kg
Účinnost	13,8	%
Špičkový výkon	145	Wp
Proud při maximálním výkonu	2,08	A
Zkratový proud	2,43	A
Napětí při maximálním výkonu	69,5	V
Napětí bez zátěže	89,4	V
Odolnost mechanického zatížení	3400	Pa
Dálka propojovacího 2,5 mm ² kabelu	320	cm
Účinnost po 25 letech provozu	Výrobce neuvádí	-
Cena	4 269	Kč (včetně DPH)

8.7.2 Instalace a zapojení FVS CIS v návrhovém systému

Rozměry střechy umožňují instalaci 22 panelů, proto aby se dosáhlo podobného výkonu jak u výše zmíněných návrhů bylo potřeba panely dobře poskládat. Na střeše jsou umístěny jak horizontálně, tak vertikálně, což je neobvyklé řešení, ale je možné, ukotvení panelů tuto možnost dovoluje. Sklon panelů je opět pod úhlem 38°. Zapojení kvůli navýšení počtu panelů je výrazně odlišné od předešlých návrhů. Rozmístění panelů s rozměry je možné vidět Příloze B.



Obr. 8.9 Zapojení panelů do dvou stringů FVS CIS

Jak je vidět na Obr. 8.9 panely jsou rozděleny na 2 stringy, neboli řetězce po 11 panelech. Ve stringu jsou panely zapojeny do série. Rozděleny jsou kvůli tomu, že je jejich napětí příliš vysoké na to, aby byly panely propojeny všechny do série. Stringy jsou pak připojeny paralelně ke střídači. Zapojením všech 22 panelů do série by se překročilo maximální povolené napětí střídače které je 1000 V.

8.7.3 Celkové investiční náklady na FVS CIS

Vzhledem k tomu, že je instalováno větší množství panelů a jejich cena je výrazně vyšší než u předešlých návrhů, celkové náklady na systém tudíž enormně vzrostou.

Tab. 8.11 Rozpis položek systému s tenkovrsvými panely a jejich cena

Položka	Doba použití [roky]	Částka včetně DPH [Kč]
22 x AVANCIS PowerMax 4.0 145 W	30	97 262
Střídač Fronius Symo Hybrid 3.0-3-S	21	48 343
Akumulátor Huawei Luna 2000-5-S0	15	84 182
Kabeláž, konektory	30	2 000
Elektrický rozvaděč	30	4 000
Elektroměry	30	4 000
Práce + nosná konstrukce	30	20 000
Cena celkem		259 783
Cena po odečtení dotace		159 783

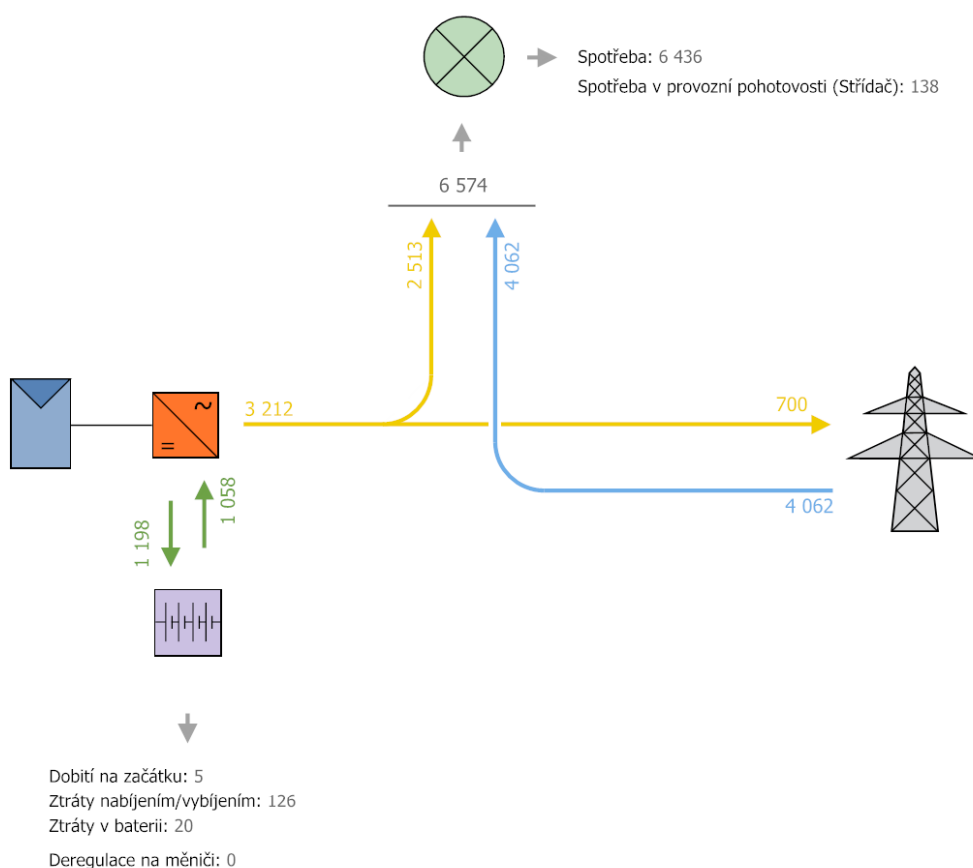
8.7.4 Shrnutí celkových výsledků a parametrů navrženého FVS CIS

V tabulce 8.12 je vidět, že FVS CIS se zařazuje svými parametry do podmínky dotačního programu Nová zelená úsporám: „FV systém s akumulací elektrické energie (min. měrná kapacita akumulátoru 1,75/1,25 kWh/kWp) a celkovým využitelným ziskem $\geq 3000 \text{ kWh/rok}$ využití převyšující požadovanou mez 70 %, s celkovým využitelným ziskem přesahující 1700 kWh/rok a za požití akumulátorového uložení“. Tato podmínka má však limit a výše dotace je do maximální částky 100 000 Kč. Vzhledem k tomu že celkové náklady činí 259 783 Kč, dotace není 50 %, ale jenom přibližně 38,49 %. Vlastní náklady jsou tedy nesrovnatelně vyšší.

U některých parametrů FVS CIS dosahuje lepších parametrů než výše zmíněné návrhy, ale u některých je zase horší, hlavně co se týče finanční analýzy, tam systém vychází velmi špatně ekonomicky, ale i přes vyšší náklady si systém na sebe vydělá a energie ve výsledku vyjde levněji než ze sítě. Systém se zaplatí až za 13,6 let. Kumulativní finanční tok je možné prohlédnout v Příloze F.

Tab. 8.12 Shrnutí hlavních parametrů navrženého systému

Parametr	Hodnota	Jednotka
Instalovaný výkon	3,19	kWp
Celkový výnos FV zařízení s baterií za rok	3 212	kWh
Celkové množství vlastní spotřeby za rok	2 513	kWh
Množství dodané energie do sítě za rok	700	kWh
Množství nakoupené energie ze sítě za rok	4 062	kWh
Celková energetická spotřeba domu za rok (+ střídač)	6 574	kWh
Celková spotřeba střídače za rok (povýšení spotřeby)	138	kWh
Stupeň využití zařízení	81,9	%
Snížení výnosu zastínění za rok	0,3	%
Podíl pokrytí solární energií (soběstačnost)	38,2	%
Podíl vlastní spotřeby	77,2	%
Celková kapitálová rendita	3,34	%
Snížení emisí CO ₂ za rok	1 376	kg
Vlastní výrobní náklady elektrické energie	3,87	Kč/kWh
Celkové výnosy a úspory za rok	11 245,4	Kč



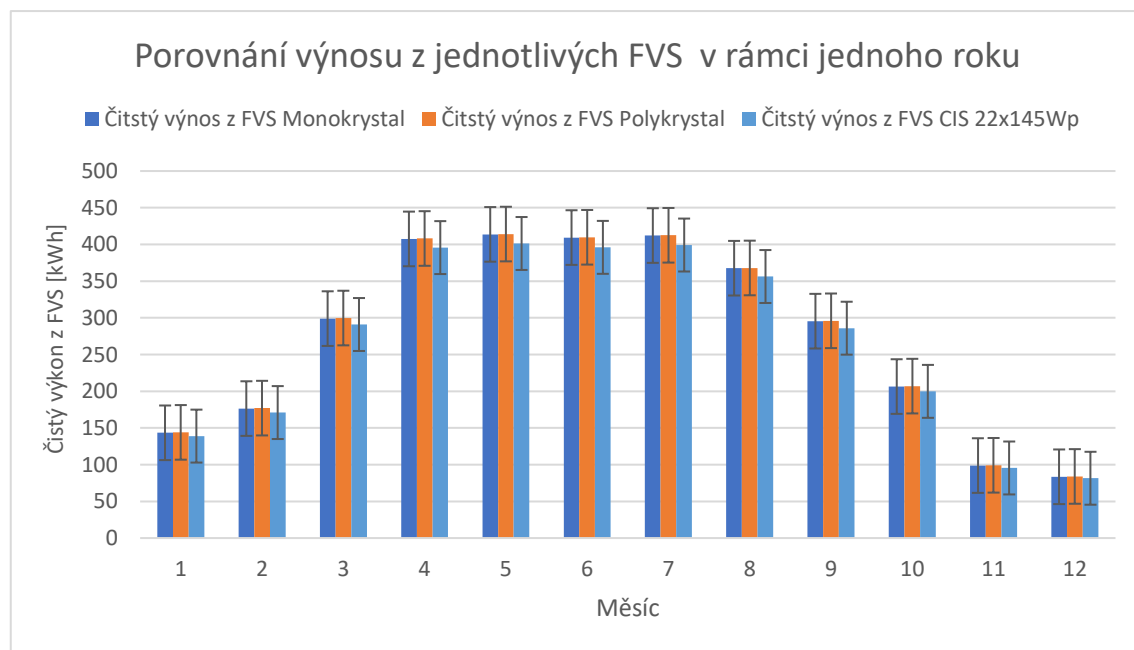
Obr. 8.10 Grafika toku energie FVS CIS

8.8 Srovnání výsledků tří návrhů

Z výstupních dat návrhů je hned zřejmé, že návrhy FVS MONO a FVS POLY jsou si dosti podobné a rozdíly v jednotlivých parametrech nejsou tak veliké, zato návrh FVS CIS je velmi odlišný. Z hlediska celkové vyrobené energie je vidět, že pro danou lokalitu má nejvyšší výtěžnost polykrystalický článek. Některé hodnoty má, ale horší, pro přesný výběr nejlepšího návrhu je třeba použít multikriteriální analýzu, aby bylo možné rozhodnout, který systém je pro instalaci v daném místě nejvýhodnější.

Systém PV*SOL umožňuje vygenerovat veškerá výsledná data do Microsoft Excelu, s daty se dá nadále dobře pracovat. Jediné, co ve výsledných datech chybí je celkový výnos FV systému. Ten lze ale snadno vypočítat sečtením dat přívodu do sítě a vlastní spotřeby. Na Obr. 8.11 je možné vidět graf porovnání výsledných výnosů výkonu z jednotlivých FV systémů po měsících. Podobné grafy je možné vidět také v Příloze E, kde je právě prognóza výnosu v porovnání s celkovou spotřebou domu. Na grafech je krásně vidět, že nejvíce svítí od dubna do července, kdy energetický výnos za měsíc přesahuje hodnotu 400 kWh. Ostatní měsíce jsou na výkonnostní úrovni daleko níže. To potvrzuje správnou funkci simulace, protože je pro výrobu nejhorší měsíc prosinec, za který obecně v ČR dopadne nejmenší množství slunečního záření.

V Příloze F je vidět porovnání jednotlivých kumulovaných finančních toků v závislosti na letech. Je vidět že všechny návrhy jsou rentabilní a systémy si vydělají i na nákup nových komponent na obnovu systému. Mírné poklesy v roce 16 a 22 znamenají nákup nového akumulátoru a střídače. Finančně nejhůře si vede návrh FVS CIS, který si na sebe s těží vydělá, ale i přesto je rentabilní.



Obr. 8.11 Výstupní graf porovnání energetických výnosů z jednotlivých návrhů

8.9 Multikriteriální analýza

Obecně je multikriteriální analýza metoda, která se používá pro rozhodování mezi několika alternativami, výsledkem je vždy jedna možná varianta, nepřipouští nikdy více variant. Pro použití multikriteriální analýzy je třeba mít několik kvantifikovatelných kritérií, která se zahrnou do rozhodování. [32]

Prvním krokem tedy bylo vybrat kritéria vhodná pro analýzu. Porovnávat kritéria jako je třeba instalovaný výkon by nedávalo smysl, byla tedy vybrána kritéria, která jsou u jednotlivých návrhů odlišná. Tato kritéria se seřadili podle důležitosti od nejdůležitějšího až po nejméně důležité a očíslovaly se postupně. Nejdůležitějším kritériem je celková cena projektu po odečtení dotace, návratnost systému a následují další kritéria která jsou důležitá např. pro získání dotačního titulu Nová zelená úsporám. Nejméně důležitým parametrem je pak snížení emisí CO₂. Obecně je tento parametr samozřejmě důležitý, ale v těchto výsledcích je jeho výsledná hodnota diskutabilní, proto má nejnižší váhu. V dalším kroku se porovnávaly výsledné hodnoty jednotlivých návrhů, nejlepší hodnota dostala 3 body, nejhorší 1 bod. Dále se vynásobilo pořadí s body a dosáhlo se váhy jednotlivých kritérií. Tyto váhy se pak sečetli a bylo dosaženo výsledné hodnoty. Návrh s nejvyšším bodovým ohodnocením je vítězný návrh.

Dle výsledků z Tab. 8.13 je možné konstatovat, že nejlepším návrhem je pro danou lokalitu FVS POLY, který má absolutně nejvíce bodů. Výsledné body u FVS MONO a FVS CIS nejsou zas tak rozdílné, což je zajímavý výsledek, vzhledem k tomu že nejvyšší váhu má cena a ta u FVS CIS kazí celkové hodnocení návrhu. U návrhu FVS CIS lze také vyzdvihnout výsledná data u snížení výnosu zastíněním, podílu vlastní spotřeby a nejnižším množstvím dodané energie do sítě. U těchto dat se potvrzuje, že tenkovrstvé panely lépe využívají difuzní složku záření a je možné čerpat energii i v podvečer, kdy už zapadá sluníčko a lidé čerpají více energie, lépe se pak rozloží využití vyrobené energie, která se nemusí akumulovat. U monokrystalu by se v tuto dobu energie negenerovala, nebo jenom minimálně. FVS POLY je ale napříč všemi výslednými hodnotami nejlepší pro dané místo instalace. Kombinuje částečně prvky jak FVS MONO tak FVS CIS.

Tab. 8.13 Výsledné hodnoty multikriteriální analýzy

Pořadí	Kritérium	FVS MONO		FVS POLY		FVS CIS	
		Hodnota	Váha	Hodnota	Váha	Hodnota	Váha
12	Cena po odečtení dotace	95 775	12x2=24	94 339	12x3=36	159 783	12x1=12
11	Návratnost systému	8,2	11x2=22	8,1	11x3=33	13,6	11x1=11
10	Podíl vlastní spotřeby	75,8	10x1=10	75,8	10x1=10	77,2	10x3=30
9	Soběstačnost	38,7	9x2=18	38,8	9x3=27	38,2	9x1=9
8	Celkový výnos FV zařízení	3 313	8x2=16	3 319	8x3=24	3 212	8x1=8
7	Množství dodané energie do sítě	769	7x2=14	770	7x1=7	700	7x3=21
6	Snížení výnosu zastínění	0,5	6x1=6	0,4	6x2=12	0,3	6x3=18
5	Stupeň využití zařízení	84,1	5x2=10	84,3	5x3=15	81,9	5x1=5
4	Celková kapitálová rendita	9,7	4x2=8	9,95	4x3=12	3,34	4x1=4
3	Celkové výnosy a úspory	11 440,3	3x2=6	11 459,9	3x3=9	11 245,4	3x1=3
2	Vlastní výrobní náklady	2,87	2x2=4	2,84	2x3=6	3,87	2x1=2
1	Snížení emisí CO ₂	1 422	1x2=2	1 425	1x3=3	1 376	1x1=1
Součet		140		194		124	

9. ZÁVĚR

Úvod práce pojednává o využití slunečního záření a principu fotovoltaického děje, byl proveden rozbor jednotlivých nepoužívanějších technologií pro výrobu FV článků a následně i panelů. Jedna z kapitol uvádí nové experimentální technologie výroby FV článků. Dále se práce podrobněji zaměřuje na použití střídačů a jejich typy pro FV systémy. Podrobně jsou také popsány používané typy akumulátorů pro FV systémy dle jejich parametrů a následně je i popsáno z čeho se celý FV systém skládá. Zajímavá část je aktuální legislativa s celkovým vyhodnocením trhu v ČR a analýza dotačních podmínek Nová zelená úsporám.

V praktické části jsou použité dosažené poznatky a reálné aplikování na dané zadání. Hlavním cílem bylo navrhnout co nejlevnější FV systém, částečně soběstačný, který bude splňovat daná kritéria pro získání dotačního titulu a bude rentabilní pro danou lokalitu. Vzhledem k tomu že se na trhu pohybuje několik technologií fotovoltaických panelů, byly navrženy tři systémy. Každý z těchto systémů byl navržen v otevřené verzi návrhového systému PV*SOL, díky využití dobrých simulačních vlastností tohoto návrhového systému bylo dosaženo několika parametrů, které bylo možné dále porovnat. K porovnání byla využita multikriteriální analýza a byl vyhodnocen nejlepší systém pro danou lokalitu.

Díky simulacím a následnému výpočtu vlastností a financování projektu, by se vygenerovaná data ze systému mohly použít pro potenciálního zákazníka a případný prodej návrhu.

Vítězným a výsledným návrhem je tedy návrh s polykrystalickými panely. Rozhodným parametrem u tohoto návrhu byla cena a hlavně to, že polykrystalické panely v porovnání s monokrystalickými panely lépe využívají difuzní složku záření, a to je pro danou lokalitu velice důležité. Tenkovrstvé panely by pro danou lokalitu byly také zajímavým prvkem z hlediska využití difuzní složky záření, ale vzhledem k jejich vysoké ceně a nižšímu výkonu na panel, jsou u výsledných simulací naprosto nevýhodné.

Celá práce také poukazuje na to, že je důležité, jak a kam se panely instalují. Vždy je totiž při návrhu FV elektrárny potřeba brát v potaz lokalitu návrhu, podnební podmínky a okolí instalace, kvůli zastínění instalované plochy. Podle toho pak vybrat správný typ panelů, které pro dané místo budou nejvýhodnější. V dnešní době se totiž objevují různé firmy, které se zabývají návrhem a instalací FV elektráren a tyto podmínky prostředí vůbec neberou v potaz. Neřeší zastínění, místo návrhu, orientaci světových stran a jen poukazují na instalovaný výkon ve Wp, je to sice zajímavý údaj, ale často se takového výkonu v dané lokalitě nedosáhne. Z instalovaného výkonu pak vypočítají výrobu a návratnost systému, v lepším případě řeší i degradaci panelů a zákazníkovi předají zajímavá ale nesmyslná data o návratnosti celé investice. Panely firma nainstaluje do stínu, nebere v potaz symetrii a asymetrii střídače a rovněž nezohledňuje opotřebení a nutnost nákupu nových komponent v průběhu životnosti celé elektrárny.

Zákazník, který není detailně obeznámen se všemi výhodami a nevýhodami spojenými s instalací a provozem fotovoltaické elektrárny může být později nespokojený, že vlivem špatného výběru komponent se elektrárna stává neúčinnou či nerentabilní nebo alespoň ne v takové míře, jako předpokládal při plánování instalace.

Další vývoj toho to projektu by mohl navázat v reálné instalaci navrženého systému na vybraný rodinný dům návrhu. Následovalo by roční porovnání dat a ověření správnosti návrhu. Nebo by projekt mohl dále poukázat na rozdíl mezi monokrystalickými a polykrystalickými panely. Z výsledků se může zdát, že rozdíl není zas tak velký, ale to může být způsobeno tím, že elektrárna je malá. U větší elektrárny, např. elektrárna pro průmyslový výrobní závod, by rozdíl mezi panely mohl hrát daleko větší roli.

LITERATURA

- [1] KŘIVÍK, Petr. *Teorie - Slunce voda* [online]. 2014, , 1 - 5 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=174794>
- [2] Mapa trvání slunečního svitu v ČR. In: *Isofenen ergy* [online]. České Budějovice: ISOFEN ENERGY, 2009 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/slunecni-zareni-v-cr.aspx>
- [3] Fotovoltaika. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaika>
- [4] FOTOVOLTAIKA: Solární (fotovoltaické) články. *CEZ: Skupina ČEZ* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [5] Fotovoltaika: Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. *Publi* [online]. Brno: Code Creator, 2020 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/03.html#3-1>
- [6] VANĚK, Jiří, Petr KŘIVÍK a Vítězslav NOVÁK. *Alternativní zdroje energie* [online]. Brno: VUT FEKT, 2006 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/259584/mod_resource/content/0/baterie/alternativni_zdroje_energie_S.pdf
- [7] Víte, jak funguje fotovoltaický článek? *Pro elektrotechniky* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <http://proelektrotechniky.cz/vzdelavani/5.php>
- [8] JOCH, Alan. Polycrystalline silicon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020, 10.12.2006 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Polycrystalline_silicon
- [9] ŘEHÁK, Jaromír, Jiří BÁRTEK a Radim BAŘINKA. FOTOVOLTAIKA A FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY V PODMÍNKÁCH ČR A JEJICH NAVRHOVÁNÍ. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha: Česká energetická agentura, 1999 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_8050.pdf
- [10] BECHNÍK, Bronislav. Historie a perspektivy OZE - fotovoltaika, technologie krystalického křemíku. *TZB - info* [online]. 9.3.2009 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5470-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-technologie-krystalickeho-kremiku>
- [11] MOFIZ, Ashad. Amorphous Silicon PV modules opens-up new possibilities for solar power generation. In: *Jakson* [online]. Noida, Indie, 11.2.2019 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.jakson.com/blog/amorphous-silicon-pv-modules-opens-up-new-possibilities-for-solar-power-generation/>
- [12] Fotovoltaické panely nové generace na bázi perovskitů se již letos začnou tisknout v Polsku. *Solární Novinky.cz* [online]. 2021, 13.01.2020 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/fotovoltaicke-panely-nove-generace-na-bazi-perovskitu-se-jiz-letos-zacnou-tisknout-v-polsku/>

- [13] Story-2018-1024x683.jpg. In: *Saule Technologies* [online]. 2019, 2019 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://sauletech.com/wp-content/uploads/2019/07/story-2018-1024x683.jpg>
- [14] LOUKOTA, Ladislav. Organické solární panely dosáhly rekordní efektivity, dohánějí 'klasiku'. *Nedd.cz* [online]. 2021, 26.8.2018 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://nedd.tiscali.cz/organicke-solarni-panely-dosahly-rekordni-efektivit-dohaneji-klasiku-317242>
- [15] Solární panel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021, 19.2.2021 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sol%C3%A1rn%C3%AD_panel
- [16] Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny. In: *Czech Nature Energy* [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [17] FOTOVOLTAIKA S AKUMULACÍ DO BATERIÍ. *TERMS* [online]. 2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <http://www.termsenergy.cz/fve-c36>
- [18] Strídač. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021, 17.1.2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/St%C5%99%C3%ADda%C4%8D>
- [19] MAULE, Petr. Druhy fotovoltaických systémů a jejich zapojení: Vliv konkrétního zapojení na návratnost (ekonomiku) provozování. In: *Fenix group* [online]. 2021, 6.8.2019 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.fenixgroup.cz/sites/default/files/20190807.pdf>
- [20] Hybridní měnič. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021, 10.5.2015 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hybridn%C3%AD_m%C4%9Bni%C4%8D
- [21] Fotovoltaická elektrárna - pojmy. *FVE systémy* [online]. 2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.fvesystemy.cz/Terminologie-a5_0.htm
- [22] HRZINA, Pavel. Akumulace elektřiny v budovách: základní parametry a technologie. *TZB - info* [online]. 2020, 27.2.2020 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20292-akumulace-elektriny-v-budovach-zakladni-parametry-a-technologie>
- [23] Mikrozdvoj (zdroj do 10 kW provozovaný bez licence). *ČEZ distribuce* [online]. Děčín, 2020 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-zakazniky/potrebuji-vyresit/mikrozdvoj.html>
- [24] Fotovoltaika pro všechny, a hlavně na střechy! *Solární Novinky.cz* [online]. Dobruška, 2020, 30.11.2020 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/fotovoltaika-pro-vsechny-a-hlavne-na-strechy/>
- [25] Dotace na solární termické a fotovoltaické systémy, řízené větrání se zpětným získáváním tepla (rekuperace), výměnu zdrojů tepla. *Nová zelená úsporám* [online]. Praha: Státní fond životního prostředí ČR, 2020 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/>

- [26] Závazné pokyny pro žadatele a příjemce podpory z podprogramu NZÚ RODINNÉ DOMY v rámci 3. výzvy k podávání žádostí. *Nová zelená úsporám* [online]. Praha: Státní fond životního prostředí ČR, 2020, 15.5.2020 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: [https://www.novazelenausporam.cz/files/documents/storage/2020/05/15/1589522543_NZ%C3%9A_Z%C3%A1vazn%C3%A9%20pokyny%20pro%20%C5%BEdatele%20RD%20\(1.5\).pdf](https://www.novazelenausporam.cz/files/documents/storage/2020/05/15/1589522543_NZ%C3%9A_Z%C3%A1vazn%C3%A9%20pokyny%20pro%20%C5%BEdatele%20RD%20(1.5).pdf)
- [27] SE_DS_Fronius_Symo_Hybrid: Datasheet Fronius Symo Hybrid *Fronius* [online]. 2021, 20n. 1., 27.7.2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Datasheets/SE_DS_Fronius_Symo_Hybrid_EN.pdf
- [28] Smart String Energy Storage System: Datasheet LUNA2000-5/10/15-S0. *Solar.huawei* [online]. 2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://solar.huawei.com/en-GB/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fattachment%2Fpdf%2F%2Fdatasheet%2FLUNA2000-5-15-S0.pdf>
- [29] Data sheet - HCM72X9-400W-415W. *Solar-eshop* [online]. 2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://static.solar-eshop.cz/files/products/3668/Data%20sheet%20-%20HCM72X9-400W-415W.pdf>
- [30] DAH_POLI_400: Datasheet HCP78X9 400~415W. *Static souenergy* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://static.souenergy.com.br/catalog/product/file/DAH_POLI_400.pdf
- [31] FE_PD_PowerMax_Datasheet. *AVANCIS* [online]. Německo, 2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.avancis.de/wp-content/uploads/2020/10/FE_PD_PowerMax_Datasheet_EN_V4.6.z_2020_09.pdf
- [32] Kalina, J., Sloupová, K., Věřeši, M., Správným směrem [online]. Jiří Kalina, 2014 [cit. 2021-05-10] Dostupné z: <http://spravnym.smerem.cz/Tema/Multikriteri%C3%A1ln%C3%AD%20anal%C3%BDza>.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FV	...	Fotovoltaika
FVS MONO	...	Fotovoltaický systém s monokrystalickými panely
FVS POLY	...	Fotovoltaický systém s polykrystalickými panely
FVS CIS	...	Fotovoltaický systém s amorfními panely CIS
AC	...	Střídavé napětí
DC	...	Stejnoseměrné napětí
Wp	...	Watt peak
Wh	...	Watt hodina

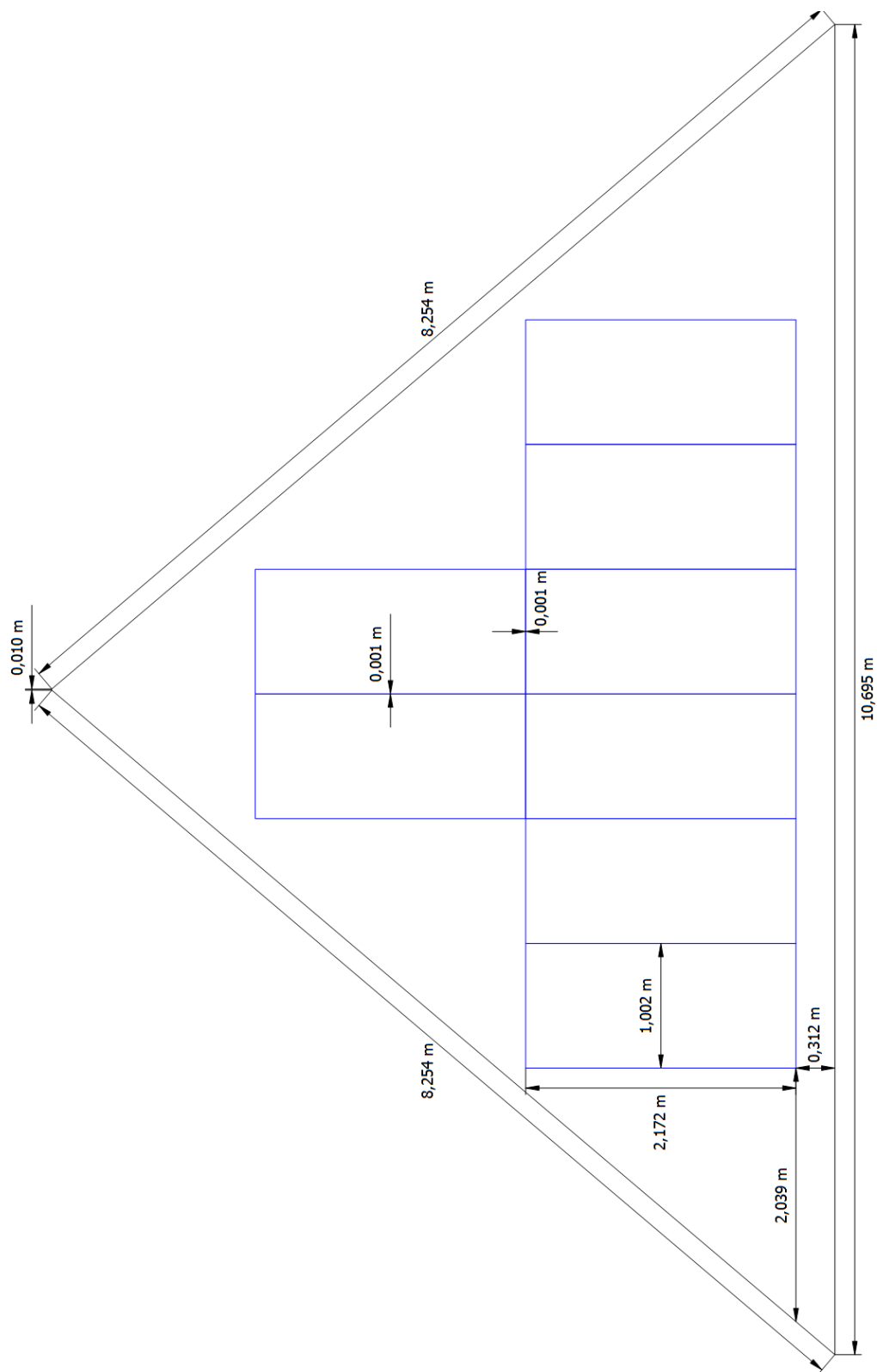
Symboly:

U	...	napětí	[V]
I	...	proud	[A]
P	...	výkon	[W]

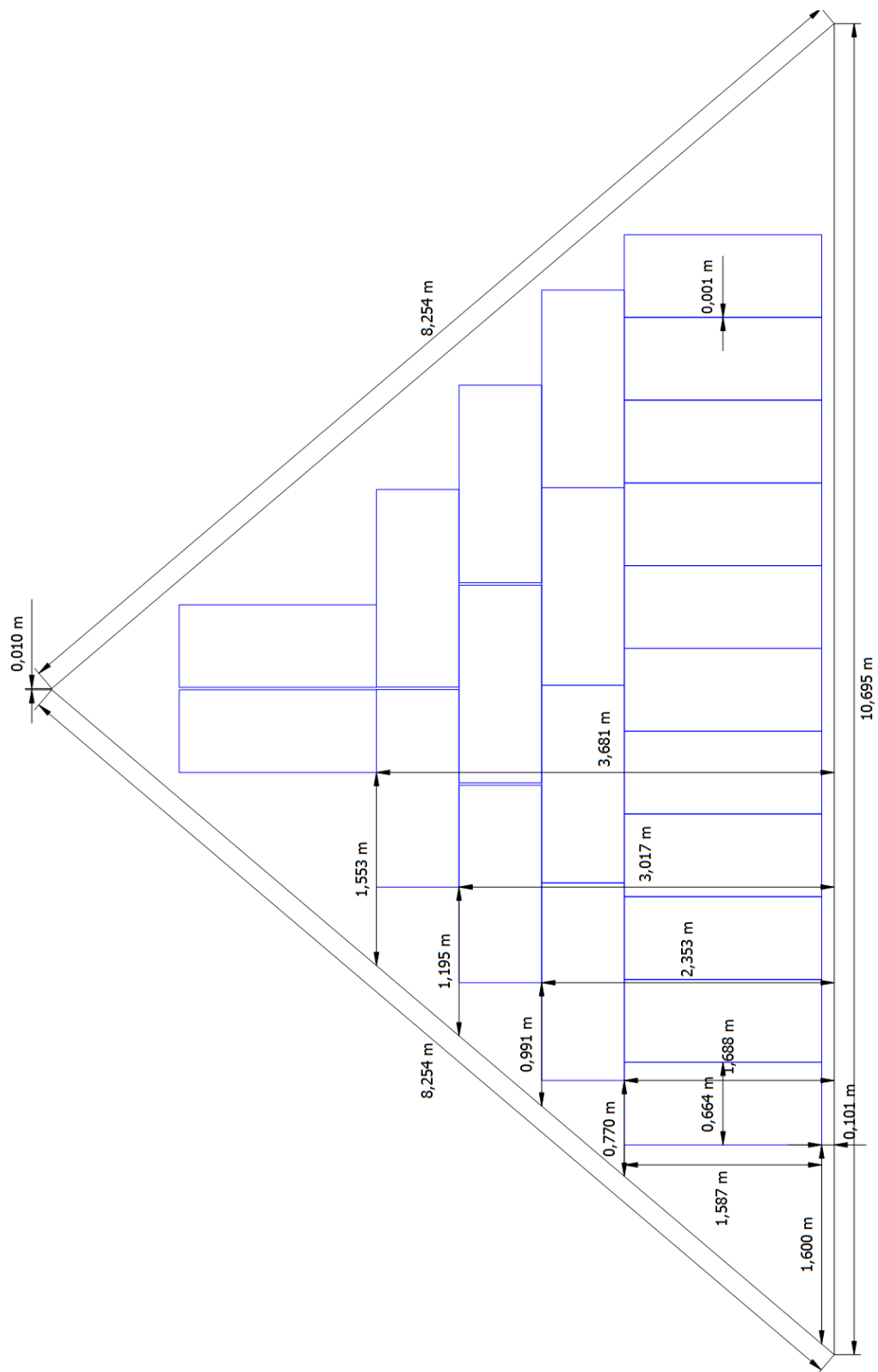
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - ROZMĚRY STŘECHY A ROZMÍSTĚNÍ PANELŮ NA STŘEŠE PRO FVS MONO A FVS POLY	67
PŘÍLOHA B - ROZMĚRY STŘECHY A ROZMÍSTĚNÍ PANELŮ NA STŘEŠE PRO FVS CIS	68
PŘÍLOHA C - SCHÉMA ZAPOJENÍ NAVRŽENÉHO FVS MONO A FVS POLY	69
PŘÍLOHA D - SCHÉMA ZAPOJENÍ NAVRŽENÉHO FVS CIS	70
PŘÍLOHA E - PROGNÓZA CELKOVÝCH VÝNOSŮ SE SPOTŘEBOU	71
PŘÍLOHA F - KUMULATIVNÍ FINANČNÍ TOKY	72
PŘÍLOHA G - K PRÁCI JE PŘILOŽEN SOUBOR S PROGRAMEM NAVRŽENÉHO FV SYSTÉMU V PV*SOL A VYGENEROVANÁ DATA S GRAFY V MS EXCEL.....	73

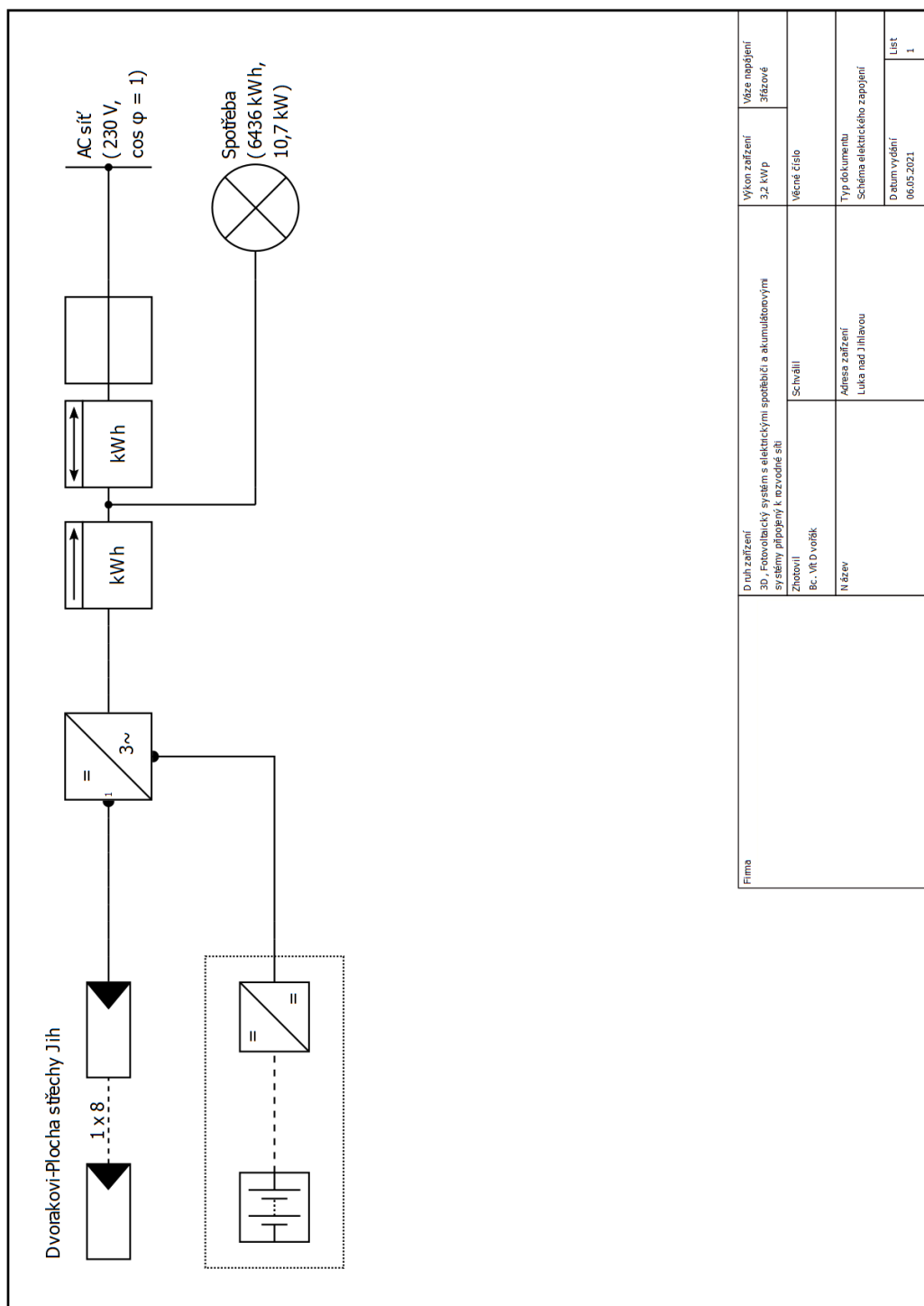
Příloha A - Rozměry střechy a rozmístění panelů na střeše pro FVS MONO a FVS POLY



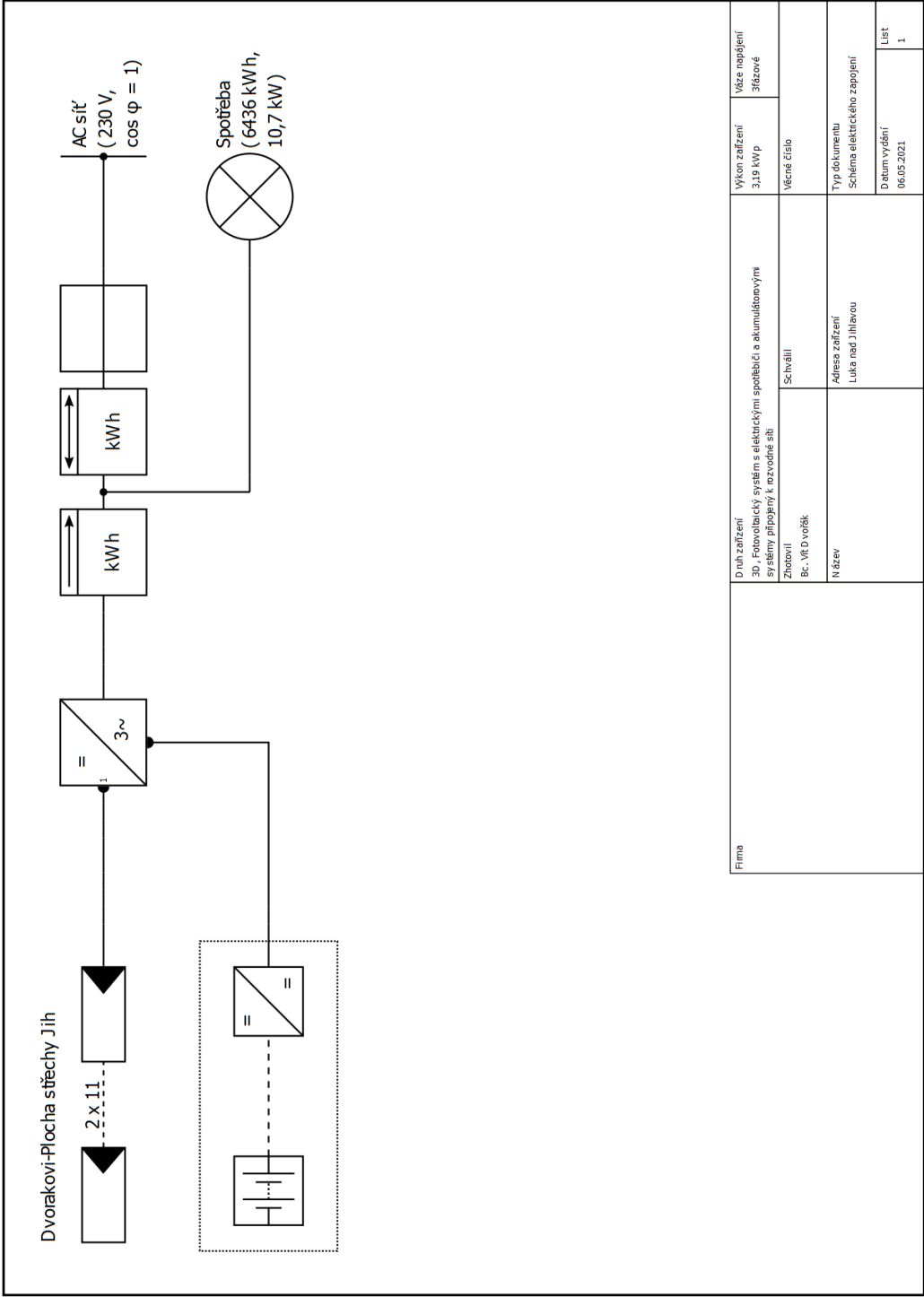
Příloha B - Rozměry střechy a rozmístění panelů na střeše pro FVS CIS



Příloha C - Schéma zapojení navrženého FVS MONO a FVS POLY



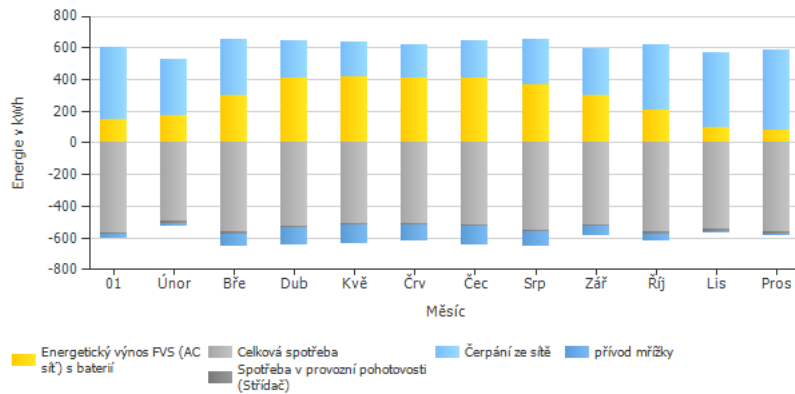
Příloha D - Schéma zapojení navrženého FVS CIS



Příloha E - Prognóza celkových výnosů se spotřebou

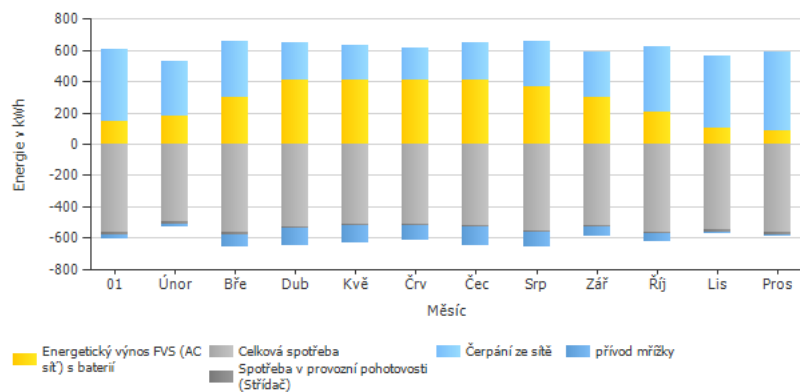
FVS MONO

Prognóza výnosů se spotřebou



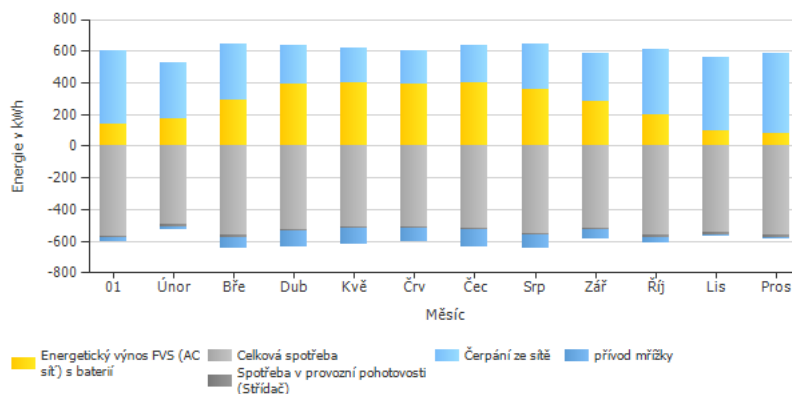
FVS POLY

Prognóza výnosů se spotřebou



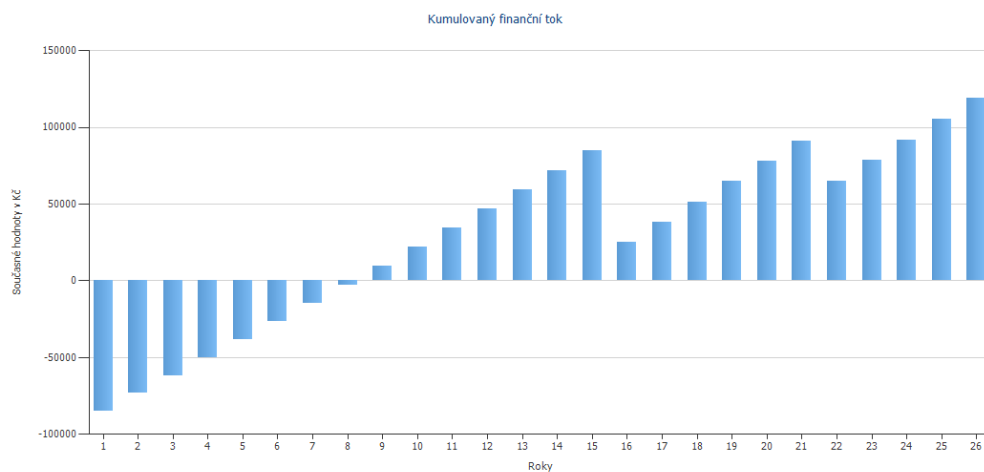
FVS CIS

Prognóza výnosů se spotřebou

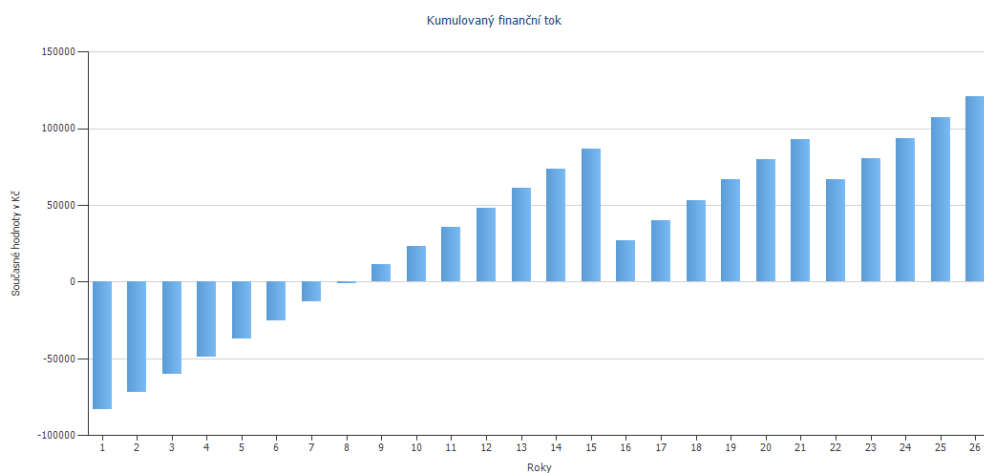


Příloha F - Kumulativní finanční toky

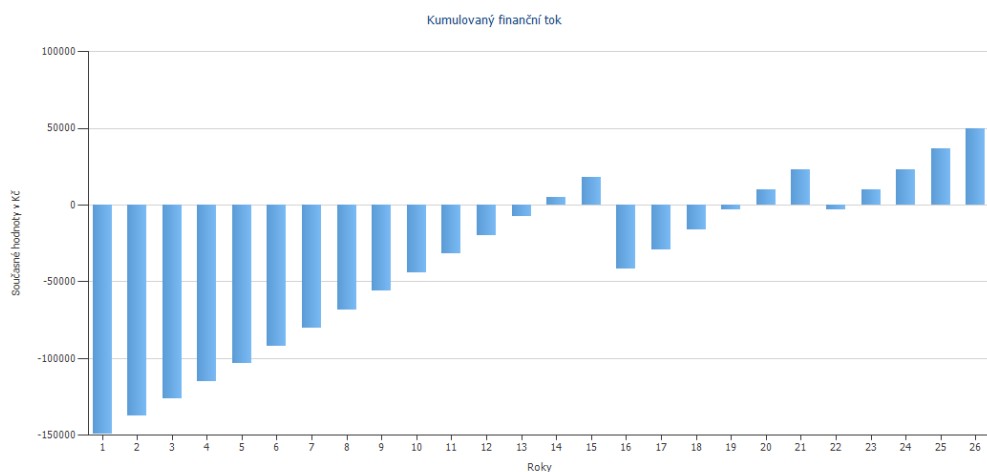
FVS MONO



FVS POLY



FVS CIS



Příloha G - K práci je přiložen soubor s programem navrženého FV systému v PV*SOL a vygenerovaná data s grafy v MS Excel

U tištěné verze práce je soubor s programem na přiloženém DVD nosiči, u elektronické verze práce je přiložen soubor s programem v zip archivu.